

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический
университет растительных полимеров»

Бельский А.П., Лакомкин В.Ю.

**Э Н Е Р Г О С Б Е Р Е Ж Е Н И Е
В Т Е П Л О Э Н Е Р Г Е Т И К Е И
Т Е П Л О Т Е Х Н О Л О Г И Я Х**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2007

Введение

Определяющая роль энергетики в экономике страны очевидна. Общеизвестны такие характерные черты нашей экономики, как высокая энергоемкость различных видов продукции, превышающая в несколько раз аналогичные показатели развитых стран.

В последние годы вопросы энергосбережения и энергоиспользования на промышленных предприятиях приобрели актуальное значение в связи с высокой стоимостью мазута, природного газа и твердого топлива, поэтому должны разрабатываться и реализовываться мероприятия по сокращению расходов топлива и теплоты на действующем и вновь проектируемом энергетическом и технологическом оборудовании с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

В технологической схеме производства различных материалов в качестве энергоносителей применяются электрическая энергия, тепловая энергия в виде пара, горячей воды, сжатого воздуха, затраты которых оказывают существенное влияние на себестоимость выпускаемой продукции.

Исходя из этого, предприятия ЦБП оснащаются энергетическим оборудованием большой мощности.

Энергоиспользование представляет собой систему мероприятий по обеспечению энергетических и технологических установок тепловой и электрической энергией и рациональному ее использованию с целью достижения проектной производительности оборудования и необходимых показателей выпускаемой продукции.

Энергоиспользование характеризуется конечной энергией, затраченной в технологическом процессе, которая зависит от расхода подведенной энергии, производительности аппаратов и их КПД.

Энергоиспользование непосредственным образом связано с энергосбережением, которое предусматривает достижение наибольшей доли полезно использованной энергии за счет минимизации потерь, оптимизации теплотехнологических процессов, рекуперации части отработавшей теплоты и возвращение ее в тепловую схему энергетической или технологической установки.

Важной характеристикой энергоиспользования является энергоемкость продукции, представляющая отношение полезно затраченной энергии к количеству вырабатываемой продукции. Чем больше энергоемкость выпускаемой продукции, тем выше механизация и

автоматизация процессов производства, тем выше производительность оборудования и показатели выпускаемой продукции.

Фактическая энергоемкость учитывает непроизводительные расходы тепловой и электрической энергии, которые необходимо сокращать.

Энергосбережение предусматривает эффективное применение органических отходов различных производств для получения теплоты и электрической энергии, а также использования вторичных энергетических ресурсов: горячей воды, теплоты отработавшей паровоздушной смеси, теплоты материалов и других источников.

В предлагаемом учебном пособии «Энергосбережение в энергетике и теплотехнологии» авторы особое внимание обратили на способы экономии топливно-энергетических ресурсов в теплотехнологических процессах производства различных материалов. Вопросы экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на ТЭЦ и в котельных агрегатах в настоящем учебном пособии рассматриваются фрагментарно, они достаточно полно изучаются в курсах «Теплогенерирующие установки промышленных предприятий», «Энергетический комплекс промышленных предприятий» и в других дисциплинах. Кроме того, авторы приводят методики выполнения расчетов экономии топливно-энергетических ресурсов.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения по специализациям «Промышленная теплоэнергетика» и «Энергетика теплотехнологий», а также инженерно-техническому персоналу, занимающемуся эксплуатацией и проектированием энергетических и теплотехнологических установок.

Авторы будут благодарны специалистам, которые сделают замечания и направят их по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4. СПб ГТУ РП, кафедра промышленной теплоэнергетики.

1. Основные направления энергосбережения в энергетических и технологических установках

1.1. Способы экономии топливно-энергетических ресурсов

В связи с высокой стоимостью натуральных видов топлива и ее быстрым ростом актуальной проблемой в промышленной энергетике, в том числе и в целлюлозно-бумажной промышленности, является разработка и внедрение мероприятий по экономии тепловой и электрической энергии, которые включают в себя повышение коэффициента использования натурального топлива на энергетических ТЭЦ, повышение эффективности использования вторичных топливных ресурсов (ВТР), наиболее полное использование вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), активное внедрение энергосберегающих технологий при производстве целлюлозы, бумаги и картона, а также организационно-технические мероприятия.

Энергетика ЦБП является своеобразной и уникальной и в значительной степени отличается от энергетики других отраслей промышленности. Своеобразие заключается в протекающих процессах и конструктивных характеристиках тепломассообменных аппаратов при варке и сушке целлюлозы, выпарке черных сульфатных щелоков и других процессов. Уникальность обусловлена наличием и использованием органических отходов, которые образуются при технологической переработке древесины в виде корьевых и древесных отходов, сульфатных и сульфитных щелоков, лигнина и биологического ила.

Энергосбережение непосредственным образом связано с защитой окружающей среды от вредных выбросов (углекислого газа, оксидов углерода, оксидов азота, сернистого ангидрида), образующихся при сжигании натуральных и вторичных топливных ресурсов. Чем больше сжигается топлива, тем больше выбрасывается вредных выбросов в окружающую среду. Следовательно, защита окружающей среды при эксплуатации энергетических установок непосредственным образом связана с рациональным использованием тепловой и электрической энергии.

Предприятия ЦБП в зависимости от их производительности в своем составе имеют энергетические котельные, корьевые котельные, энергетические теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), энерготехнологические ТЭЦ, каждая из которых является источником загрязнения окружающей среды.

Если оставить вне рассмотрения топливный производственный комплекс, энергетика ЦБП представляет собой совокупность органически связанных производственно-технологических циклов:

- прием, хранение и транспортировка энергетического и вторичного топлива;
- преобразование топлива в теплоту и электрическую энергию и транспортировка этих видов энергии к потребителям;
- использование различных форм энергии в теплотехнологических установках с целью получения бумаги, картона, древесно-волокистых плит и других видов продукции.

На энергетических ТЭЦ экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и защита окружающей среды может достигаться путем внедрения следующих мероприятий:

- комбинированной выработки тепловой и электрической энергии;
- регенеративного подогрева питательной воды;
- внедрения парогазовых установок для выработки тепловой и электрической энергии;
- внедрения промежуточного перегрева пара;
- применения пара высокого давления;
- газификации твердого и жидкого топлива и применения искусственного газа в качестве топлива для котельных агрегатов;
- использования теплоты циркуляционной воды, охлаждающей конденсатор;
- установки котельных агрегатов и турбогенераторов большой единичной мощности;
- перевода котельных малой мощности в режим работы тепловой станции за счет установки паровых турбин;
- использования водомазутных эмульсий, водоугольных суспензий, водогазовых аэрозолей;
- нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов.

Россия первая в мире осуществила идею комбинированного производства тепловой и электрической энергии в одной установке на ТЭЦ, где коэффициент использования топлива в 1,5 раза выше, чем на ТЭС, производящих эти виды энергии раздельно.

Необходимо отметить, что если преобразование потенциальной энергии топлива в теплоту пара в котельных агрегатах происходит с высоким КПД ($\eta = 80-90\%$), то использование теплоты в теплотехнологических установках составляет всего 30-60 %, поэтому значительным резервом повышения эффективности использования теплоты

и, соответственно, топлива является рационализация теплотехнологических процессов и установок. Существенным источником тепловой и электрической энергии в энергетике ЦБП являются черные щелока, образующиеся при сульфатной варке древесины. Поступая на сжигание в топку содорегенерационных котельных агрегатов (СРК) черный сульфатный щелок содержит 40-45 % влаги и 55-60 % абсолютно сухого вещества, состоящего из органической части (65-75 %) и минеральной части (30-35 %). Черный сульфатный щелок не имеет аналогов среди топлив, применяемых в энергетике других отраслей промышленности. С теплотехнической точки зрения, черные сульфатные щелока представляют собой высоковлажное, высокосолевое топливо с низкой теплотой сгорания $Q_1^r = 7400-9000$ кДж/кг. Для замены 1 м^3 природного газа необходимо затратить 3,8-4,6 кг сульфатного черного щелока.

В соответствии с тепловыми балансами целлюлозно-бумажных предприятий сжигание сульфатного щелока позволяет обеспечить 70-75 % технологического потребления теплоты.

В целях снижения влажности щелоков в схемах СРК предусмотрены каскадные испарители, в которых при контакте продуктов сгорания со щелоком происходит испарение влаги из щелока и снижение температуры продуктов сгорания. Одновременно происходит испарение из щелока дурнопахнущих и вредных веществ, загрязняющих окружающую среду.

В последние годы для защиты окружающей среды вместо каскадных испарителей в схемах СРК стали применять концентраты, представляющие собой выпарные аппараты с автономным теплоснабжением, применение которых позволяет повысить концентрацию сухих веществ до 75 %.

По мере увеличения содержания сухого вещества в щелоке возрастает теплота сгорания черного щелока и повышается температура горения в топке, в результате чего уменьшаются выбросы сернистых соединений, улучшается степень восстановления минеральных солей. Кроме того, при повышении концентрации щелока сокращаются потери теплоты и увеличивается КПД котельного агрегата, меньше забиваются уносом поверхности нагрева, что уменьшает расход пара на обдувку, а также сокращаются простои котельного агрегата.

На сульфит-целлюлозных предприятиях в результате варки целлюлозы образуется сульфитный щелок, который имеет теплоту

сгорания на сухую массу $Q_i^f = 9720$ кДж/кг и в большинстве случаев сжигается совместно с сульфатными щелоками.

Биологический ил, образующийся в результате очистки сточных вод, представляет собой высоковлажное ($W_t^f > 55\%$), низкокалорийное топливо (при влажности 55 % $Q_i^f = 3500-5000$ кДж/кг), которое в настоящее время на предприятиях не сжигается, а отвозится в отвалы, загрязняя водные бассейны, занимая земельные площади.

Основным препятствием к сжиганию биологического ила является высокая влажность и мелкодиспергированная твердая фракция, обладающая низкой скоростью витания, следствием чего является забивание газоходов и теплообменных аппаратов.

Вторичные энергетические ресурсы являются также значительным источником экономии ТЭР. К ним можно отнести следующие виды:

- теплоту паровоздушной смеси, удаляемой из сушильной части бумагоделательных машин и систем общеобменной вентиляции;
- теплоту парогазовой смеси, выбрасываемой из котельных агрегатов;
- теплоту технологической сбросной воды и теплой воды из конденсаторов паровых турбин и сточных вод бумагоделательных машин;
- теплоту нагретого материала.

Значительный эффект в экономии ТЭР может быть достигнут рациональным сбором и возвратом на ТЭЦ конденсата от тепло-технологических установок.

В качестве перспективных мероприятий в области экономии ТЭР является применение теплонасосных установок, устанавливаемых для утилизации низкопотенциальной теплоты паровоздушной смеси, а также теплой воды от энергетических и технологических установок.

Значительную экономию ТЭР следует ожидать от внедрения на предприятиях ЦБП энергосберегающей технологии, включающей в себя применение передовых технологических процессов, увеличивающих производительность установок, повышение качественных показателей готовой продукции, стабилизацию работы оборудования, снижение выбросов, загрязняющих атмосферу.

К таким мероприятиям следует отнести применение импульсной сушки бумаги и картона, которая увеличивает производительность сушильной части в 3-4 раза.

ЦБП отличается от других предприятий большим расходом воды, применяемой в технологических процессах, поэтому целесообразно применять замкнутую систему водопользования.

Значительную экономию теплоты на предприятии можно получить, разработав научно обоснованные удельные нормы расхода теплоты и топлива. Нормы должны быть разработаны для каждого предприятия, так как они располагаются в различных климатических зонах, имеют различные сырьевые базы и способы доставки древесного сырья.

Важную роль в экономии ТЭР играет проведение на предприятиях ЦБП организационно-технических мероприятий, включающих в себя диспетчеризацию, компьютеризацию и учет тепловой и электрической энергии; обновление энергетического и теплотехнологического оборудования, имеющего более высокие технико-экономические показатели; изоляцию паропроводов, теплопроводов, баков горячей воды и других нагретых поверхностей; применение закрытых схем сбора и возврата конденсата; периодическую диагностику энергетического и теплотехнологического оборудования. В оргтехмероприятиях важная роль должна отводиться составлению тепловых балансов оборудования и помещений, на основании которых выявляются источники тепловых потерь и мероприятия по их уменьшению.

1.2. Оценка энергосбережения в теплотехнологических процессах и установках

В целях анализа полноты использования теплоты, поступающей в энергетические и теплотехнологические установки, а также нормирования тепловой энергии и топлива применяется несколько способов, основанных на составлении материального и теплового балансов тепломассообменных аппаратов.

Нормирование расхода теплоты, топлива и электрической энергии - это установление научно обоснованной плановой меры их рационального потребления. Целью нормирования является разработка и внедрение в производство прогрессивных мер расхода, обеспечивающих экономное использование топливно-энергетических ресурсов в производстве.

Принцип составления теплового баланса любой энергетической или теплотехнологической установки основывается на равенстве приходных и расходных статей.

При составлении теплового баланса важным обстоятельством является определение границ, через которые теплота приходит в установку и уходит из нее. Тепловой баланс можно составлять как для всей установки, так и для отдельных ее элементов. Умение составлять и анализировать уравнение теплового баланса различных энергетических и теплотехнологических установок, а затем принимать инженерные решения – это важнейшее условие при изучении данного курса.

Распространенным способом определения энергетических затрат на производство того или иного вида продукции является расчет часового расхода теплоты или мощности по уравнению теплового баланса следующего вида

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i = Q'_1 + Q'_2 + \dots + Q'_n . \quad (1.1)$$

Левая часть уравнения (1.1) соответствует количеству теплоты, поступающей в установку от различных источников энергии, а правая часть этого уравнения выражает расход теплоты, уносимой из установки.

Из уравнения (1.1) следует основное определение теплового баланса – сколько теплоты через мнимую границу вошло в установку, столько же теплоты (через эту же границу) вышло.

Уравнение теплового баланса тепломассообменной установки, выраженное в процентах, имеет вид

$$\begin{aligned} 100\% &= \frac{Q'_1}{\sum_1^n Q_n} 100\% + \frac{Q'_2}{\sum_1^n Q_n} 100\% + \dots + \frac{Q'_n}{\sum_1^n Q_n} 100\% = \\ &= q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n , \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ – источники поступления теплоты в установку, кДж/ч; $Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_n$ – потери теплоты установкой, кДж/ч .

КПД энергетической установки можно выразить через отношение полезно затраченной теплоты $Q_{\text{пол}}$ ко всей подведенной теплоте $Q_{\text{под}}$

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{под}}} \cdot 100 \% . \quad (1.3)$$

Для котельного агрегата полезно использованная теплота - это теплота, затраченная на нагревание питательной воды, образование пара и его перегрев

$$Q_{\text{пол}} = D_{\text{п}} (i'' - i_{\text{пв}}) , \text{ кДж/ч} , \quad (1.4)$$

где $D_{\text{п}}$ - производительность котельного агрегата, кг/ч; i'' - энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $i_{\text{пв}}$ - энтальпия питательной воды, кДж/кг.

Для нагревания материала без изменения его фазового состояния полезно затраченная теплота рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{м}} C_{\text{м}} (t_1 - t_0) , \text{ кДж/ч} , \quad (1.5)$$

где $G_{\text{м}}$ - производительность тепломассообменной установки, кг/ч; $C_{\text{м}}$ - теплоемкость материала, кДж/(кг·°C); t_0 , t_1 - начальная и конечная температуры материала, °C.

Для газообразных сред полезная теплота равна

$$Q_{\text{пол}} = L (I_1 - I_0) , \text{ кДж/ч} , \quad (1.6)$$

где L - массовый расход газообразной среды, кг/ч; I_0 , I_1 - начальная и конечная энтальпии среды, кДж/кг.

Подведенная теплота рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{под}} = B_{\text{т}} Q_{\text{р}} = B_{\text{т}} (Q_{\text{I}}^{\text{r}} + C_{\text{т}} t_{\text{т}} + \alpha V_{\text{в}}^0 C_{\text{в}} t_{\text{в}}) , \text{ кДж/ч} , \quad (1.7)$$

где $B_{\text{т}}$ - расход топлива, кг/ч; $Q_{\text{р}}$ - расчетная теплота сгорания топлива, кДж/кг; Q_{I}^{r} - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $C_{\text{т}}$ - теплоемкость топлива, кДж/(кг·°C); $t_{\text{т}}$ - температура топлива, °C; α - коэффициент избытка воздуха.

В промышленности наиболее распространенной является оценка расхода тепловой энергии по затратам теплоты, отнесенным к единице выпускаемой продукции. Уравнение при этом имеет следующий вид

$$\frac{Q_1}{G_{\text{м}}} + \frac{Q_2}{G_{\text{м}}} + \dots + \frac{Q_i}{G_{\text{м}}} = \frac{Q_1'}{G_{\text{м}}} + \frac{Q_2'}{G_{\text{м}}} + \dots + \frac{Q_n'}{G_{\text{м}}} , \text{ кДж/кг} , \quad (1.8)$$

где G_M – производительность тепломассообменной установки по выпускаемой продукции, кг/ч.

Или то же уравнение, выраженное в удельных затратах теплоты на единицу вырабатываемой продукции

$$q_1 + q_2 + \dots + q_i = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n, \text{ кДж/кг} . \quad (1.9)$$

Для сушильных установок характерна оценка эффективности их работы по удельным расходам теплоты, отнесенных к часовому расходу испаряемой влаги. Уравнение при этом имеет вид

$$\frac{Q_1}{M} + \frac{Q_2}{M} + \dots + \frac{Q_n}{M} = \frac{Q'_1}{M} + \frac{Q'_2}{M} + \dots + \frac{Q'_n}{M}, \text{ кДж/кг влаги}, \quad (1.10)$$

где Q_1, Q_2, Q_n – приходные статьи теплового баланса, кДж/ч; Q'_1, Q'_2, Q'_n – расходные статьи теплового баланса, кДж/ч; M – расход испаряющейся влаги в сушильной установке, кг/ч.

Для теплотехнологических установок также как и для энергетических, для оценки эффективности работы может применяться коэффициент полезного действия (КПД), который равен отношению полезно использованной теплоты ко всей подведенной.

На основании уравнения теплового баланса выражение для КПД теплотехнологической установки запишем в следующем виде

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_{\text{пол}}}{\sum_1^n Q_{\text{прих}}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) - (Q'_1 + Q'_2 + \dots + Q'_n)}{\sum_1^n Q_{\text{прих}}} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (1.11)$$

Если в тепловой схеме теплотехнологической установки предусмотрены устройства для рекуперации теплоты, то тогда КПД повышается за счет снижения потерь теплоты в окружающую среду.

На основании выполненного анализа теплового баланса энергетической или теплотехнологической установки разрабатываются инженерные мероприятия по сокращению потерь теплоты, а также возврату в тепловую схему установки части отработавшей тепловой энергии.

Расчеты, как правило, сводятся к определению экономии топлива ΔB , которая рассчитывается по формуле

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_i^r \cdot \eta} \text{ , кг/ч ,} \quad (1.12)$$

где ΔQ – экономия тепловой энергии за счет внедрения энергосберегающих технологий, кДж/ч; Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; η – КПД выработки тепловой энергии.

Для топливных энергетических и теплотехнологических аппаратов эффективность сжигания топлива при заданных условиях характеризуется коэффициентом использования топлива, который равен отношению максимально возможного использования теплоты ко всей теплоте, которая выделяется при его сжигании

$$\eta_{\text{кит}} = \frac{Q_i^r + Q_{\text{фт}} + Q_{\text{фв}} - Q_{\text{ух}}}{Q_i^r + Q_{\text{фт}} + Q_{\text{фв}}} \cdot 100 \% \text{ ,} \quad (1.13)$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $Q_{\text{фв}}$ – физическая теплота воздуха, кДж/кг; $Q_{\text{фт}}$ – физическая теплота топлива, кДж/кг; $Q_{\text{ух}}$ – теплота уходящих газов, кДж/кг, расчет см. в «Тепловом расчете котельных агрегатов (Нормативный метод)», 1999 г.

Энергосбережение также может характеризоваться затратами тепловой и электрической энергии на единицу вырабатываемой продукции

$$q = \frac{N_{\text{э}}}{G_y} \text{ , кДж/кг ,} \quad (1.14)$$

где $N_{\text{э}}$ – расход электрической энергии, кВт·ч; G_y – производительность установки, кг/ч.

Для оценки энергетической эффективности промышленных установок часто пользуются удельным расходом топлива, который равен отношению расхода топлива B_T к производительности установки G_y

$$b_T = \frac{B_T}{G_y} \text{ , } \frac{\text{кг топлива}}{\text{кг продукции}} \text{ .} \quad (1.15)$$

Для паротурбинных установок расход топлива B_T относят к вырабатываемой электрической энергии $N_э$

$$\epsilon_э = \frac{B_T}{N_э} , \quad \frac{\text{кг топлива}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} . \quad (1.16)$$

На рис. 1.1 приведена схема распределения тепловых потоков для нагревания заготовок в тепломассообменной установке, на примере работы которой показан расчет показателей использования теплоты.

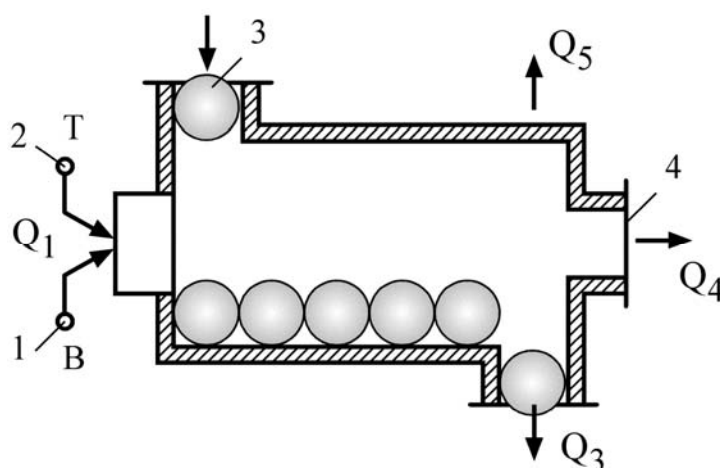


Рис. 1.1. Схема тепломассообменной установки для нагревания изделий:
1 – подача воздуха; 2 – подача топлива; 3 – заготовки;
4 – уходящие газы

Уравнение теплового баланса для данной установки имеет вид

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 , \quad \text{кДж/ч} , \quad (1.17)$$

где Q_1 – теплота, поступающая в рабочую камеру с топливом; Q_2 – теплота, поступающая в рабочую камеру с материалом; Q_3 – теплопотери с материалом; Q_4 – теплопотери с уходящими газами; Q_5 – теплопотери в окружающую среду.

Технологический КПД для данной установки равен отношению теплоты, затраченной на нагревание изделия, к подведенной в установку теплоте

$$\eta_T = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 \% . \quad (1.18)$$

Энергетический КПД представляет собой отношение использованной теплоты продуктов сгорания ко всей подведенной в установку теплоте

$$\eta_{\text{э}} = \frac{Q_1 - Q_4}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 \% \quad (1.19)$$

Относительные потери с уходящими газами – это отношение потерь теплоты с уходящими газами ко всей затраченной теплоте, подведенной в установку

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 \% \quad (1.20)$$

Относительные потери с нагретым материалом - это отношение потерь теплоты с нагретым материалом ко всей подведенной теплоте в установку

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 \% \quad (1.21)$$

Относительные потери теплоты в окружающую среду - это отношение потерь теплоты в окружающую среду через стенки установки ко всей подведенной теплоте в установку

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_1 + Q_2} \cdot 100 \% \quad (1.22)$$

1.3. Энергосбережение в теплотехнологических установках целлюлозно-бумажных предприятий

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности имеют несколько источников теплоэлектроснабжения, которые могут применяться в различных вариантах в зависимости от характера и производительности предприятия.

Для крупных предприятий оптимальным считается вариант, когда имеются энергетическая тепловая электрическая централь (ТЭЦ), энерготехнологическая ТЭЦ и утилизационная ТЭЦ или котельная.

Энергетические ТЭЦ используют натуральные виды топлива (газ, мазут, уголь, торф, сланцы) и вырабатывают тепловую и электрическую энергию по самой экономичной комбинированной схеме. В качестве парогенерирующих агрегатов применяются самые разнообразные по конструктивным и режимным характеристикам

котельные установки: низкого, среднего и высокого давления; с принудительной и естественной циркуляцией; высокой и низкой производительности.

В качестве паротурбинных установок на энергетических ТЭЦ применяют турбины малой (до 25 тыс. кВт) и средней (до 100 тыс. кВт), с противодавлением типа Р, с производственным отбором и противодавлением типа ПР, а также конденсационные турбины с одним, типа Т и П, и двумя регулируемые отборами пара типа ПТ.

Энергетические ТЭЦ имеют широкий диапазон начальных параметров пара: от 3,5 МПа ($t_{\text{не}} = 435^\circ\text{C}$) до 12,5 МПа ($t_{\text{не}} = 565^\circ\text{C}$).

Энерготехнологические ТЭЦ включены в схему сульфат-целлюлозного производства, в которых содорегенерационные котельные агрегаты служат для регенерации химикатов при сжигании органических веществ, входящих в состав черного сульфатного щелока. Образующаяся при этом теплота продуктов сгорания служит для получения пара.

В энерготехнологических ТЭЦ применяются содорегенерационные котельные агрегаты зарубежных фирм Тампелла, SMW, Альстрем-Варкаус, Парсонс-Уитмор, Мицубиси и отечественные агрегаты типа СРК-320У, СРК-625У, СРК-700 и другие. СРК имеют две характеристики: технологическую и энергетическую. Технологическая характеристика отражает суточную производительность по абсолютно сухому веществу, а энергетическая - часовую производительность по пару, давление и температуру перегретого пара.

На энерготехнологических ТЭЦ устанавливаются в основном паровые турбины с противодавлением типа Р.

На сульфит-целлюлозных предприятиях, вырабатывающих целлюлозу на натриевом и магниевом основаниях, дополнительным источником энергии являются сульфитный щелок, барда и концентрат, которые сжигаются в магниерегенерационных котельных агрегатах с целью восстановления активности химических веществ и получения дополнительной тепловой энергии.

Утилизационные котельные служат для сжигания корьевых и древесных отходов, а в некоторых котельных вспомогательным вторичным топливом является лигнин.

В настоящее время в корьевых котельных отсутствуют паротурбинные установки, однако с все возрастающим дефицитом электроэнергии целесообразно и в корьевых котельных устанавливать паровые турбины.

Некоторые бумажные фабрики в своем составе имеют котельные небольшой производительности, в которых вырабатывается пар низкого или среднего давления и тепловому потребителю пар направляется через редукционно-охладительные установки (РОУ).

Имеются фабрики, у которых источники энергоснабжения отсутствуют, тогда электрическая энергия поступает из системы, а тепловая – покупается у соседнего предприятия.

Энерготехнологические и утилизационные ТЭЦ работают с низкими и средними давлением пара до 3,5 МПа.

Пар, поступающий в теплотехнологические установки, конденсируется, отдает свою теплоту поверхностям нагрева и частично или полностью возвращается в тепловую схему ТЭЦ. В отбельных башнях нагревание волокнистой суспензии производится путем непосредственного смешения волокнистой суспензии и пара. Конденсат от теплоиспользующих установок перекачивается в деаэратор, куда также поступает конденсат из бойлеров и подогревателей питательной воды.

Перечисленные теплотехнологические аппараты потребляют пар различных параметров, но их можно объединить в несколько групп, для которых требуется пар давлением:

- 4,0 МПа – цех древесно-волокнистых плит и фанерный завод;
- 1,0 МПа – на плавление серы;
- 0,6 - 0,8 МПа – на варку целлюлозы и в древесно-подготовительный цех;
- 0,3 - 0,5 МПа – на сушку бумаги, на отбелку целлюлозы, на спиртовой завод, на выпарку щелоков, в цех белильных растворов, на вентиляцию бумаго- и картоноделательных машин.

Отпуск пара производственным потребителям может производиться из отборов или противодавления турбины, через редукционно-охладительные установки (РОУ), от паропреобразовательных установок, получающих пар из противодавления турбин.

В целях экономного расходования топливно-энергетических ресурсов на ТЭЦ и сокращения потребления тепловой энергии теплотехнологическими установками к предприятиям должны предъявляться следующие требования:

- создавать нормативную базу по энергопотреблению и энергосбережению;
- оснащать крупных потребителей приборами учета и ведения контроля за расходами тепловыми энергетическими ресурсами,

анализировать их расход и повышать экономическую заинтересованность в энергосбережении;

- отборы у паровых турбин должны соответствовать параметрам пара, потребляемого теплотехнологическим оборудованием;

- по возможности уменьшать количество пара, пропускаемое через редуционно-охладительные установки;

- на ТЭЦ должна быть предусмотрена комбинированная выработка тепловой и электрической энергии с максимальным КПД;

- транспортировка теплоносителя к месту потребления должна осуществляться с минимальными потерями;

- давление и температура пара в коллекторах теплоиспользующих установок должны поддерживаться в соответствии с технологическим регламентом;

- потери теплоты в окружающую среду теплотехнологическими установками должны быть минимальными;

- осуществлять эффективное использование вторичных энергетических ресурсов за счет рекуперации теплоты отработавшей паровоздушной смеси и продуктов сгорания;

- использовать теплоту нагретых материалов, сточных вод и других низкотемпературных источников;

- максимально использовать пары вскипания;

- эффективно использовать вторичные топливные ресурсы, образующиеся при технологической переработке древесного сырья;

- сокращать потери теплоты при пуске и останове теплового оборудования;

- поддерживать равномерный график теплопотребления технологическим оборудованием или создавать аккумулирующие устройства для компенсации пиковых нагрузок;

- разрабатывать и внедрять энергосберегающие технологические процессы производства целлюлозно-бумажных материалов.

2. Энергосбережение в промышленных печах

2.1. Классификация печных установок

Печь – это высокотемпературная теплотехнологическая установка, в которой происходит генерация теплоты и передача ее материалу, который подвергается тепловой обработке с целью придания ему необходимых физико-механических или химических свойств.

Для создания высоких температур в рабочей камере сжигается природный газ, твердое или жидкое топливо, а также применяется электрическая энергия. В связи с широким распространением печных установок в промышленности, энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве около 60 % добываемых топливно-энергетических ресурсов в стране расходуется в печных установках, поэтому экономное расходование топлива имеет большое значение для экономики страны.

Печные установки включают в себя следующие элементы: рабочую камеру, в которой происходит генерация тепловой энергии и передача ее обрабатываемому материалу; горелки, форсунки, регенераторы, рекуператоры, дымососы, вентиляторы и другое оборудование.

Печи делятся на промышленные и бытовые; *по назначению* – на плавильные, нагревательные, обжиговые, сушильные, отопительные, кондитерские, хлебопекарные и другие. *По виду нагрева* различают пламенные и беспламенные печи.

Печные установки различают также *по технологическому назначению*:

- плавильные (доменные, литейные, стеклоплавильные и другие);
- нагревательные печи (термические, кузнечные, методические и другие);
- обжиговые печи (известеобжигательные, цементные, для обжига фарфора и глиняных изделий),
- печи химической промышленности (для получения сернистого ангидрида и др.).

По конструктивным и тепловым признакам:

- туннельные печи;
- камерные и многокамерные печи;
- кольцевые печи;
- шахтные печи;
- вращающиеся барабанные печи и другие.

По способу нагрева материала:

- беспламенные печи;
- пламенные печи;
- электрические.

По режимным характеристикам:

- непрерывного действия;
- периодического действия.

По способу регенерации теплоты:

- регенеративные печи;
- рекуперативные печи.

По виду применяемого топлива:

- мазутные;
- газовые;
- для твердого топлива.

На рис. 2.1 приведена схема печной установки, включающая в себя рабочую камеру для генерации теплоты и передачи ее материалу, регенераторы, котел-утилизатор, теплообменные аппараты для нагрева газообразного топлива и дутьевого воздуха, обеспечивающие энергосбережение приведенной печной установки.

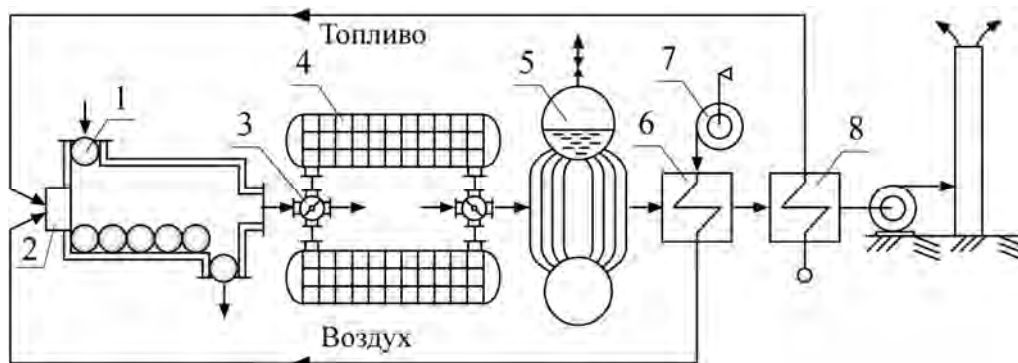


Рис. 2.1. Схема энергосбережения отработавших продуктов сгорания:

- 1 – нагреваемые заготовки в рабочей камере; 2 – горелка;
 3 – перекидной клапан; 4 – регенеративный воздухоподогреватель; 5 – котел-утилизатор; 6 – воздухоподогреватель;
 7 – вентилятор; 8 – подогреватель топлива

2.2. Доменные печи

Доменные печи предназначены для получения чугуна из рудосодержащих материалов путем плавления в восстановительной среде при высокой температуре.

Чугун представляет собой сплав железа с углеродом, содержание которого колеблется от 2 до 4 %. При содержании углерода меньше 2 - 4 % сплав превращается в сталь, а выше этого значения - в чугун.

Доменная печь – непрерывно действующая высокотемпературная теплотехнологическая установка, потребляющая энергию в виде кокса, природного газа, сжатого воздуха, высокотемпературного воздуха для горения, электрическую энергию. Печь, предназначенная для получения чугуна, представляет собой шахту, в которую загружается шихта (железорудный агломерат, окатыши, кокс, флюсы). Снизу через фурмы вводят нагретый воздух, жидкое, газообразное или пылевидное топливо.

Доменная печь состоит из высокой шахты, в верхней части которой имеется засыпной аппарат и колошник, а нижняя часть шахты заканчивается распаром, заплечиками и горном (рис. 2.2).

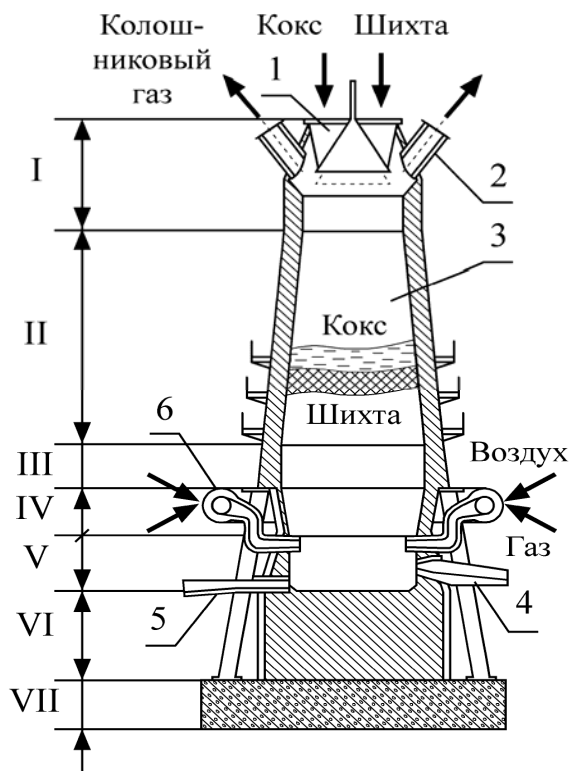


Рис. 2.2. Схема доменной печи:

- 1 – загрузочная горловина; 2 – отвод колошниковых газов;
- 3 – слои кокса и шихты; 4 – летка для шлака; 5 – летка для чугуна; 6 – фурма; I – горловина; II – шахта; III – распар;
- IV – заплечики; V – горн; VI – фундамент; VII – основание

Шахта доменной печи круглого сечения, внутренняя часть которой выложена огнеупорным материалом. В горне на высоте 0,5-2,0 м располагаются отверстия для выпуска чугуна – чугунные летки; в средней части горна находятся отверстия для выпуска шлака – шлаковые летки; в верхней части горна имеются отверстия для воздушных фурм. Шахта и распар выложены из шамотного кирпича высокого качества, а горн – графитизированными блоками.

Давление газов в доменной печи достигает 0,3-0,5 МПа, поэтому кладка заключена в стальную броню (кожух) толщиной 25-40 мм. Для предупреждения перегрева футеровки ее охлаждают воздухом или водой. Засыпной аппарат состоит из большого конуса с воронкой и малого конуса с вращающейся воронкой.

Доменная печь стоит на массивном фундаменте из огнеупорного бетона. За счет кислорода воздуха в горне доменной печи происходит горение природного газа или мазута. Продуктами горения являются газы CO , CO_2 , H_2O , H_2 и N_2 , которые, поднимаясь вверх, нагревают шихтовые материалы и восстанавливают из окислов железо, марганец и другие элементы. Образовавшийся чугун и шлак стекают в нижнюю часть печи, и по мере накопления их выпускают через летки в ковши. В районе горна установлены фурмы (горелки) для плавления чугуна и поддержания высокой температуры горения, через которые подается воздух с температурой 1100-1200 °С и горючий газ с температурой 1000-1100 °С.

Режим работы доменной печи по высоте шахты характеризуется протеканием одновременно взаимосвязанных температурных, аэродинамических и химических процессов. Шихта при движении сверху вниз претерпевает ряд последовательных изменений и превращений: дегидратацию (удаление связанной влаги), диссоциацию (разложение газов с поглощением теплоты), восстановление, плавление, шлакообразование.

В доменной печи восстановление железа из окислов происходит двумя путями:

- газами CO и H_2 , так называемое косвенное восстановление;
- твердым углеродом - прямое восстановление.

Реакция восстановления железа из его окислов косвенным путем протекает с положительным тепловым эффектом; реакция восстановления сопровождается большим поглощением теплоты.

Раскаленные куски кокса, омываемые жидким шлаком, восстанавливают из окислов металла железо и другие элементы прямым путем. Прямым способом восстанавливается 20-30 % железа,

косвенным – 70-80 %. Раскаленный углерод при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ восстанавливает также углекислый газ CO_2 и водяные пары H_2O с большим отрицательным эффектом. Для создания восстановительной среды в шахте печи процесс горения кокса ведут при недостаточном количестве воздуха ($\alpha < 1,0$). Приведем некоторые профессиональные термины, применяемые в металлургической промышленности.

Шихта – смесь материалов в определенной пропорции: рудные концентраты, флюсы и другие компоненты для переработки в доменных печах.

Флюс – материалы, вводимые в шихту для образования продукции с определенными физическими и химическими свойствами.

Агломерация – термический способ окускования мелких рудных материалов путем спекания для улучшения их металлургических свойств.

Агломерат – продукт агломерации, используется в качестве сырья для черной и цветной металлургии.

Руда – природное минеральное образование, содержащее в своем составе металл или несколько металлов в концентрированном виде, при котором выгодно их извлечение (Fe_2O_3 – магнитный железняк; $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – бурый железняк).

Тепловой баланс доменной печи

Примерный тепловой баланс доменной печной установки имеет следующий вид

$$\begin{aligned} Q_{\text{ш}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{экз}} = \\ = Q_{\text{ч}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{окр}} + Q_{\text{кг}} + Q_{\text{ух.г}} + Q_{\text{энд}}, \text{ кДж/ч} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Левая часть уравнения (2.1) представляет собой теплоту, поступающую в доменную печь (приходные статьи). Правая часть уравнения выражает количество теплоты, которое удаляется из печной установки (расходные статьи теплового баланса).

На рис. 2.3 приведена схема доменной печной установки с тепловыми потоками.

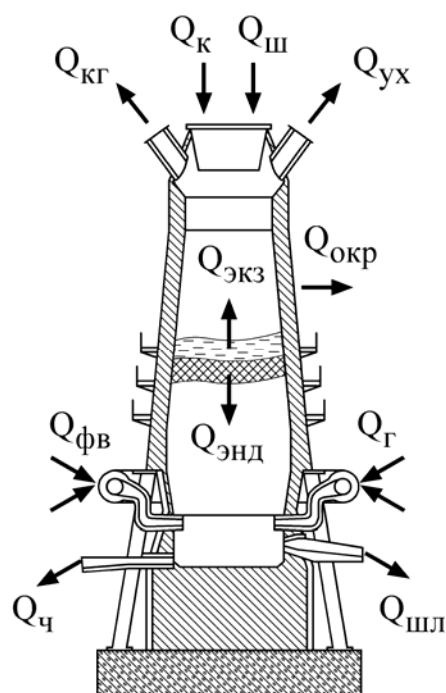


Рис. 2.3. Схема доменной печи к расчету теплового баланса

Приходные статьи

Теплота, вносимая в печь с шихтой

$$Q_{\text{ш}} = G_{\text{ш}} \bar{C}_{\text{рш}} t_{\text{ш}} , \text{ кДж/ч} , \quad (2.2)$$

где $G_{\text{ш}}$ – массовый расход шихты, поступающей в печь, кг/ч;

$\bar{C}_{\text{р}}$ – средняя теплоемкость композиционных материалов, кДж/(кг · °C);

$$\bar{C}_{\text{р}} = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} , \quad (2.3)$$

где $m_1, m_2, \dots, m_n$ – массовые расходы компонентов, образующих смесь, кг/ч; $c_1, c_2, \dots, c_n$ – теплоемкости соответствующих компонентов, кДж/(кг · °C).

Теплота, выделяющаяся при горении кокса в шахте доменной печи

$$Q_{\text{к}} = Q_i^{\text{r(к)}} V_{\text{к}} , \text{ кДж/ч} , \quad (2.4)$$

где $V_{\text{к}}$ – массовый расход кокса, кг/ч; $Q_i^{\text{r(к)}}$ – низшая теплота сгорания кокса, кДж/кг.

Как показывают балансовые испытания, основное количество теплоты выделяется при горении кокса в шахте доменной печи (62 %).

Примерный состав и теплота сгорания каменноугольного кокса по рабочей массе: $W^r = 6\%$; $A^r = 10,34\%$; $C^r = 80,3\%$; $S^r = 1,42\%$; $H^r = 0,5\%$; $N^r = 0,92\%$; $O^r = 0,5\%$. Выход летучих горючих веществ $V^{daf} = 0\%$, размер куска кокса должен быть > 25 мм. Низшая теплота сгорания кокса $Q_i^r = 31425 - 33520$ кДж/кг.

Теплота, поступающая в печь с нагретым воздухом для горения кокса

$$Q_{\phi B}^{(K)} = \alpha V_B^0 \rho_B t_B V_K C_p, \text{ кДж/ч}, \quad (2.5)$$

где α – коэффициент избытка воздуха, $\alpha = 0,5-0,6$; V_B^0 – теоретический расход воздуха для горения кокса, $\text{м}^3/\text{кг}$; C_p – теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_B – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho_B = 1,293 \frac{273}{273 + t_B}$;

t_B – температура дутьевого воздуха, $t_B = 1100 - 1200$ $^\circ\text{C}$.

Теплота, вносимая в печь с физической теплотой и выделяющаяся при горении природного газа

$$Q_G = B_G (Q_i^d + C_T t_T), \text{ кДж/ч}, \quad (2.6)$$

где B_G – расход газообразного топлива, кг/ч ; Q_i^d – низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/кг ; C_T – теплоемкость топлива, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_T – температура топлива, $t_T = 1100-1200$ $^\circ\text{C}$.

С достаточной точностью можно принимать $Q_G = (0,10-0,12) Q_K$.

Теплота, выделяющаяся в результате химических реакций, протекающих с положительным тепловым эффектом

$$Q_{\text{экз}} = G_{\text{ш}} q_{\text{экз}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.7)$$

где $q_{\text{экз}}$ – удельная теплота, выделяющаяся в результате протекания экзотермических реакций, кДж/кг .

Расходные статьи

Теплота, уносимая из печи с расплавленным чугуном (5,7 %)

$$Q_{\text{ч}} = G_{\text{ч}} C_{p\text{ч}} t_{\text{ч}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.8)$$

где $G_{\text{ч}}$ – среднечасовая производительность доменной печи, кг/ч; $C_{\text{рч}}$ – теплоемкость жидкого чугуна, кДж/(кг·°C); $t_{\text{ч}}$ – температура расплавленного чугуна, $t_{\text{ч}} = 1450-1520$ °C .

Теплота, уносимая из печи жидким шлаком (3,0 %)

$$Q_{\text{шл}} = G_{\text{шл}} C_{\text{шл}} t_{\text{шл}} , \text{ кДж/ч} , \quad (2.9)$$

где $G_{\text{шл}}$ – среднечасовой выход шлака из плавильной камеры, кг/ч; $C_{\text{шл}}$ – теплоемкость твердого шлака, $C_{\text{шл}} = 0,18$ кДж/(кг·°C); $t_{\text{шл}}$ – температура жидкого шлака, $t_{\text{шл}} = 1450-1520$ °C .

Потери теплоты в окружающую среду и в том числе, с охлаждением печи водой или воздухом

$$Q_{\text{окр}} = \sum_1^n k_i F_i \Delta t_i + G_{\text{в}} C_{\text{в}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}) , \text{ кДж/ч}, \quad (2.10)$$

где k_i – коэффициент теплопередачи, кДж/(м²·°C·ч); $G_{\text{в}}$, $C_{\text{в}}$ – расход и теплоемкость охлажденного агента, кг/ч; $t_{\text{в2}}$, $t_{\text{в1}}$ – конечная и начальная температуры охлажденного агента , °C.

Расчет потерь теплоты в окружающую среду целесообразно рассчитывать по отдельным участкам в связи с тем, что температура и толщина футеровки (поверхность теплообмена) изменяется по высоте.

Для ориентировочных расчетов потери теплоты в окружающую среду принимают 8-10 % от тепловыделения в результате горения кокса

$$Q_{\text{окр}} = (0,08-0,10) Q_{\text{к}} , \text{ кДж/ч} . \quad (2.11)$$

Основное количество теплоты уходит из доменной печи с колошниковым газом (42,4 %). Данная теплота включает в себя сумму тепловых эффектов от сжигания окиси углерода, водорода и углеводородов (химическая неполнота сгорания), а также физическую теплоту продуктов сгорания.

Химическая теплота, уносимая с колошниковым газом

$$Q_{\text{кг}} = B_{\text{к}} \left[1 + \frac{(0,1-0,12) Q_i^{\text{г(к)}}}{Q_i^{\text{д}}} \right] \times \\ \times (q_{\text{CO}} V_{\text{CO}} + q_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2} + q_{\text{C}_m\text{H}_n} V_{\text{C}_m\text{H}_n}) , \text{ кДж/ч}, \quad (2.12)$$

где q_{CO} – тепловой эффект от сжигания окиси углерода, $q_{\text{CO}} = 127,6$ кДж/м³; V_{CO} – объем CO, образовавшийся при горении

колошникового газа, м^3 ; q_{H_2} – тепловой эффект от сжигания водорода, $q_{\text{H}_2} = 107,7 \text{ кДж/м}^3$; V_{H_2} – объем H_2 , образовавшийся при горении колошникового газа, м^3 ; $q_{\text{C}_m\text{H}_n}$ – тепловой эффект от сжигания углеводородного соединения, кДж/м^3 ; $V_{\text{C}_m\text{H}_n}$ – объем C_mH_n , образовавшийся при горении колошникового газа, м^3 ; $Q_i^{r(k)}$ – низшая теплота сгорания кокса, кДж/кг ; Q_i^d – низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м^3 .

Применение газообразного топлива в доменных печах в формуле (2.12) учтено вторым слагаемым.

Примерный состав доменного колошникового газа, %, следующий: $V_{\text{CO}_2} = 10,5$; $V_{\text{CO}} = 28$; $V_{\text{H}_2} = 2,7$; $V_{\text{CH}_4} = 0,3$; $V_{\text{N}_2} = 58,5$.

Теплота сгорания колошникового сухого газа $Q_i^d = 3972 \text{ кДж/м}^3$.

Физическая теплота колошникового газа, уходящая из доменной печи:

$$Q_{\text{yx}} = \left\{ B_{\text{к}} \left[V_{\text{г}}^{o(k)} + (1 - \alpha) V_{\text{в}}^{o(k)} \right] + B_{\text{г}} \left[V_{\text{г}}^{o(r)} + (1 - \alpha) V_{\text{в}}^{o(r)} \right] \right\} \times \\ = C_{\text{yx}} t_{\text{yx}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.13)$$

где $B_{\text{к}}$ – часовой расход кокса, кг/ч ; $V_{\text{г}}^{o(k)}$ – теоретический объем продуктов сгорания при сжигании кокса, $\text{м}^3/\text{кг}$; α – коэффициент избытка воздуха; $V_{\text{в}}^{o(k)}$ – теоретический расход воздуха, необходимый для горения кокса, $\text{м}^3/\text{кг}$; $B_{\text{г}}$ – расход газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{г}}^{o(r)}$ – теоретический объем продуктов сгорания газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $V_{\text{в}}^{o(r)}$ – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C_{yx} – теплоемкость колошникового газа, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Теплота, затрачиваемая на протекание эндотермических реакций

$$Q_{\text{энд}} = \sum_1^n (G_{\text{ок}} q_{\text{ок}} + G_{\text{г}} q_{\text{г}}), \text{ кДж/ч}, \quad (2.14)$$

где $G_{\text{ок}}$ – массовый расход руды, кг/ч ; $q_{\text{ок}}$ – удельная теплота эндотермической реакции, кДж/кг ; $G_{\text{г}}$ – массовый расход продуктов

сгорания, кг/ч; q_r – удельная теплота эндотермических реакций газообразных веществ, кДж/кг.

Далее необходимо полученные слагаемые приходных и расходных статей подставить в уравнение теплового баланса (2.1) и определить необходимый параметр, чаще всего производительность доменной печной установки или расход топлива при известной производительности. Рассчитывается удельный расход топлива на производство 1 тонны чугуна. Полученные расчетные данные сравниваются с фактическими и выполняется анализ причин расхождения, намечаются мероприятия по сокращению потерь теплоты и топлива.

Также определяется КПД доменной печи, представляющий отношение полезной теплоты к затраченной. Авторы считают, что к полезной теплоте в доменной печи нужно относить теплоту, затраченную на нагревание и плавление шихты.

КПД доменной печи можно представить в следующем виде

$$\eta_{\text{дп}} = \frac{Q_{\text{к}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{экз}} - (Q_{\text{окр}} + Q_{\text{кг}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{энд}})}{Q_{\text{к}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{экз}}} \cdot 100\%$$

или

$$\eta_{\text{дп}} = \frac{G_{\text{ч}} [C_{\text{рч}} (t_{\text{ч}}^{\text{пл}} - t_{\text{ч}}^0) + \lambda_{\text{пл}}] + G_{\text{шл}} [C_{\text{ршл}} (t_{\text{шл}}^{\text{пл}} - t_{\text{шл}}^0)]}{Q_{\text{к}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{экз}}} \cdot 100\%, \quad (2.15; 2.16)$$

где $t_{\text{ч}}^0$; $t_{\text{ч}}^{\text{пл}}$; $t_{\text{шл}}^0$; $t_{\text{шл}}^{\text{пл}}$ – соответственно начальная температура чугуна и температура плавления чугуна, начальная температура шлака и его плавления, °С.

Основным показателем тепловой работы доменной печи является ее тепловой КПД, достигающий 42-45 %. Кроме того, доменная печь вырабатывает 1600-1900 м³/т доменного газа с теплотой сгорания $(3,8 - 4,2) \cdot 10^3$ кДж/м³ (900-1000 ккал/м³). С учетом теплоты сгорания доменного газа и энергии чугуна КПД доменной печи составит 80-85 %.

Теплота сгорания топлива характеризуется коэффициентом использования топлива $\eta_{\text{ит}}$, представляющим отношение полезной теплоты, использованной в рабочей камере, ко всей подведенной теплоте, выраженным в процентах

$$\varepsilon_{\text{ит}} = \frac{Q_i^r + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{фв}} - Q_{\text{ух}}}{Q_i^r + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{фв}}} \cdot 100 \% \quad (2.17)$$

Анализ потерь теплоты в целях энергосбережения производится в относительных величинах, затем результаты расчетов сравниваются с нормативными показателями.

Относительные потери теплоты в окружающую среду

$$q_{\text{окр}} = \frac{Q_{\text{окр}}}{Q_{\text{к}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{экз}}} \cdot 100\% = \frac{Q_{\text{окр}}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{подв}}} \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Относительные потери теплоты с колошниковым газом

$$q_{\text{кг}} = \frac{Q_{\text{кг}}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{подв}}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Относительные потери теплоты с физической теплотой уходящего колошникового газа

$$q_{\text{ф.кг}} = \frac{Q_{\text{кг}}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{подв}}} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

Относительные потери теплоты с эндотермическими реакциями

$$q_{\text{энд}} = \frac{Q_{\text{энд}}}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{подв}}} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

Преимуществом доменной печи является высокая производительность и высокий КПД, а недостатком – повышенные требования к композиции шихты и значительное потребление топливно-энергетических ресурсов.

Для обеспечения высокой температуры горения топлива дутьевой воздух и газообразное топливо нагревают до температуры 1100-1200 °С в специальных теплообменных аппаратах Каупера, которые представляют собой шахту с выложенными внутри специальным образом насадками из шамотных изделий (рис. 2.4).

Регенераторы (не менее двух) работают попеременно: в первом - насадка нагревается за счет сжигания природного газа, а во втором регенераторе насадка охлаждается, а воздух нагревается. Изменение режима охлаждения и нагрева производится автоматически перекидными клапанами.

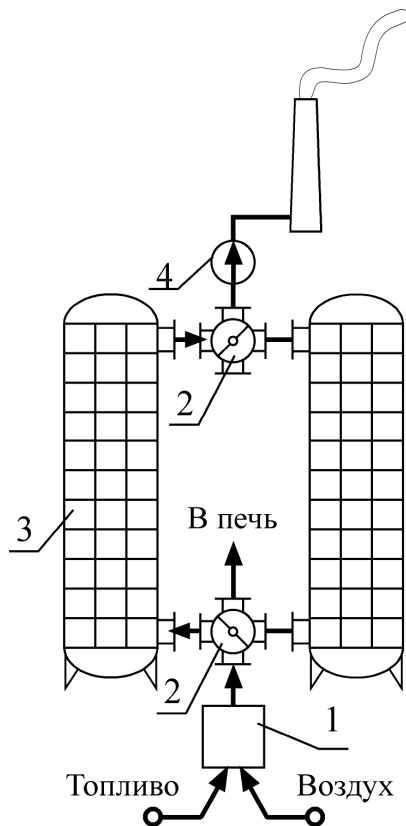


Рис. 2.4. Схема включения регенераторов для высокотемпературного нагрева воздуха и природного горючего газа:

1 – камера горения; 2 – перекидной клапан; 3 – регенеративный теплообменный аппарат с насадками; 4 – дымосос

В приходных статьях теплового баланса тепло поступает в доменную печь следующим образом: с коксом – 62 % ; с природным газом – 17 % ; с кислородом – 3,1 % ; с воздушным дутьем для горения – 5,7 % ; с доменным газом – 8,2 % ; с коксовым газом – 1,4 % .

Кроме того, в производственных условиях цеховые расходы для обеспечения выпуска продукции относят к теплотехнической установке, расходы которой составляют: пара – 1,1 % ; электроэнергии – 0,5 % ; технической воды – 0,2 % ; сжатого воздуха – 0,2 % ; горячей воды – 0,1 %.

К расходным статьям относятся следующие показатели теплового баланса: с колошниковым газом – 42,4 % ; с жидким

чугуном – 5,7 % ; с жидким шлаком – 3 % ; потери в окружающую среду – 6,7 % .

2.3. Методические печи

После прокатки слитков на блюмингах и слябингах стальные заготовки приобретают квадратные или прямоугольные сечения с размерами 400×400 или 250×1000 мм и длиной 10-12 м. Для дальнейшей технологической обработки заготовки нагревают до температуры 1200-1250 °С в методических печных установках непрерывного действия с несколькими тепловыми зонами по длине. Металл перемещается от загрузочного до разгрузочного окна, проходя последовательно все тепловые зоны, в соответствии с требуемым графиком нагрева.

Методическая печь представляет собой туннель, на одном конце которого находится загрузочное устройство и отвод продуктов сгорания, а на противоположном – разгрузочное устройство и горелки. Перемещение заготовок производится с помощью толкателя – при загрузке одной заготовки нагретая заготовка выдается с противоположной стороны (рис. 2.5).

Рекомендуемый температурный режим поддерживается при наличии газовых горелок, которые могут располагаться снизу и сверху туннеля ближе к разгрузочному концу туннеля. Холодный металл поступает в зону низких температур продуктов сгорания, постепенно продвигаясь в зону более высоких температур.

Методическая печь – тепломассообменный аппарат с противоточным движением греющего агента и нагреваемого материала.

Первая по ходу металла зона называется методической с равномерно повышающейся температурой продуктов сгорания газообразного топлива. Постепенный нагрев металла в методической зоне должен обеспечивать необходимую скорость нагрева, при которой не возникает недопустимого перепада температур по сечению заготовки.

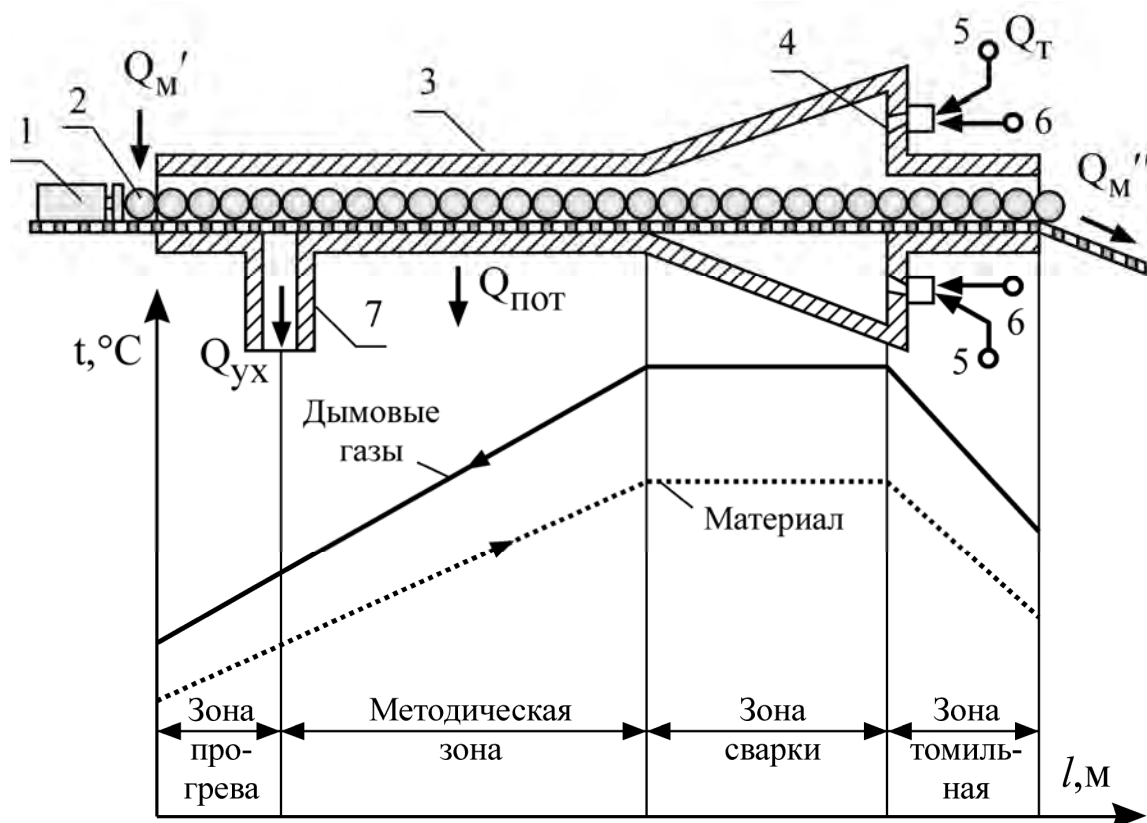


Рис. 2.5. Схема методической печной установки:

- 1 – толкатель заготовки; 2 – заготовки; 3 – туннель;
- 4 – горелка; 5 – подвод горячего газа; 6 – подвод воздуха,
- 7 – отвод продуктов сгорания

Вторая по ходу металла зона – это зона максимальной температуры, носит название сварочной зоны, в ней происходит тепловое воздействие на металл максимальной температуры продуктов сгорания. Назначение этой зоны – быстрый нагрев заготовок до температуры 1150-1250 °С, для чего необходимо температуру газов поддерживать на 150-250 °С выше температуры заготовок. В сварочной зоне происходит теплообмен излучением, а в остальных зонах – конвективный теплообмен.

В методических толкательных печах возможен односторонний и двухсторонний нагрев металла. Односторонний нагрев осуществляется в том случае, когда металл только с одной стороны – сверху. Для ускорения нагрева в современных печах предусматривают и нижний обогрев заготовок. Третья по ходу движения металла зона выдержки, так называемая томильная зона, служит для выравнивания температуры по сечению материала, которая должна быть на 50-70 °С выше необходимой конечной температуры. Для обеспечения в сварной

зоне температуры 1350-1400 °С следует выбирать топливо и параметры подогрева дутьевого воздуха и топлива так, чтобы температура горения топлива составляла 1900-2000 °С. При сжигании доменного и коксового газов с низкой температурой сгорания 5800 кДж/м³ требуется подогревать воздух до температуры 500-600 °С, а газ до 250-300 °С. При нагревании материала различают термически тонкие и термически массивные тела (рис. 2.6).

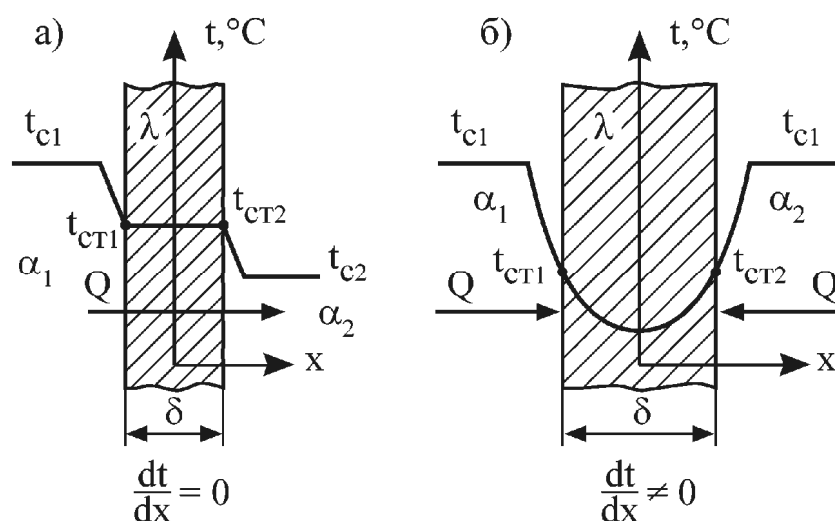


Рис. 2.6. Температурные поля в сечении термически тонких (а) и массивных материалов (б):

t_{c1}, t_{c2} – температуры среды, °С; t_{ct1}, t_{ct2} – температуры стенки, °С;
 δ – толщина материала, м; Q – тепловой поток, кДж/с

У термически тонких материалов распределение температуры по толщине материала равномерное, а градиент температуры равен нулю $\left(\frac{dt}{dx} = 0\right)$.

У термически массивных материалов распределение температуры по толщине материала неравномерное $\left(\frac{dt}{dx} \neq 0\right)$, в результате чего возникают термические напряжения, приводящие к разрушению, короблению и другим дефектам обрабатываемого материала.

Расчет длительности нагрева материала в методических печах за счет конвективного теплообмена

На рис. 2.7 показан подвод теплоты к материалу из окружающей среды за счет теплообмена dQ_T и воспринятой теплоты, описываемой уравнением теплового баланса dQ_6 , а на рис. 2.8 – изменение температуры материала во времени на поверхности и в центре. В результате неравномерного распределения по толщине материала могут возникать термические напряжения, приводящие к короблению материала, трещинообразованию и другим дефектам.

Для решения этой задачи воспользуемся уравнениями теплового баланса dQ_6 и теплообмена dQ_T

$$dQ_6 = m C dt \quad , \quad \text{кДж/ч} \quad ; \quad (2.22)$$

$$dQ_T = \alpha F (t_c - t) d\tau \quad , \quad \text{кДж/ч} \quad . \quad (2.23)$$

В соответствии с равенством dQ_6 и dQ_T

$$m C dt = \alpha F (t_c - t) d\tau \quad , \quad (2.24)$$

где t_c – температура среды, °С; α – коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/(м²·°С); t – температура материала, °С; m – расход материала, кг/ч; C – массовая теплоемкость нагреваемого материала, кДж/(кг·°С).

В уравнении (2.24) разделим переменные величины:

$$\frac{dt}{t_c - t} = \frac{\alpha F}{m C} \cdot d\tau . \quad (2.25)$$

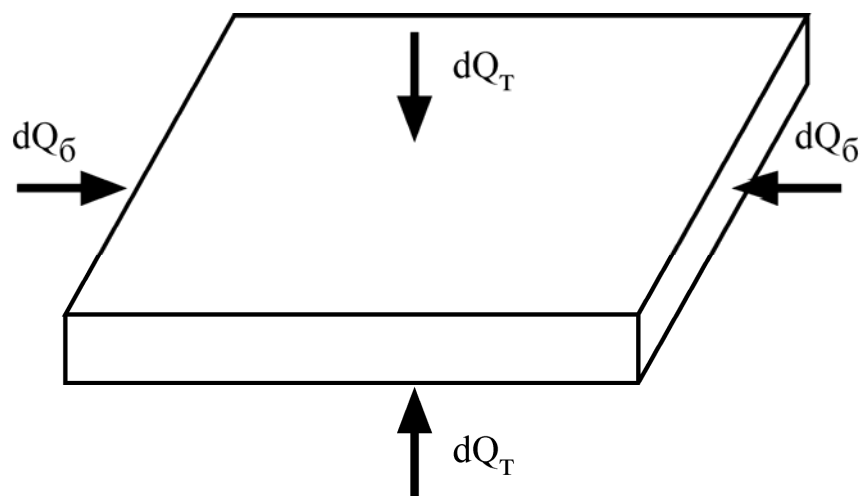


Рис. 2.7. Схема подвода теплоты к пластине

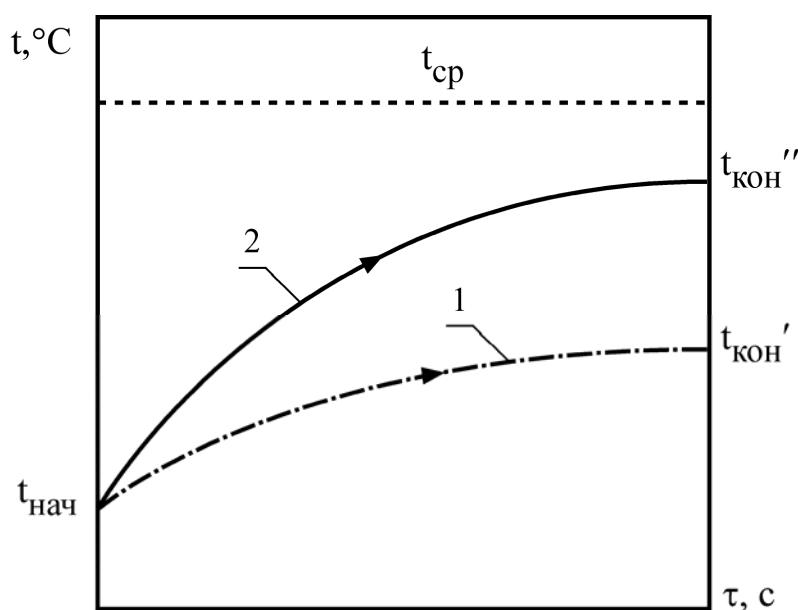


Рис. 2.8. График изменения температуры в сечении массивного тела:
1 – температура в центре материала; 2 – температура на поверхности материала; t_{cp} – температура среды

Проинтегрируем уравнение (2.25)

$$\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} \frac{dt}{t_c - t} = \frac{\alpha F}{mC} \int_0^{\tau_H} dF \quad . \quad (2.26)$$

После интегрирования получаем

$$\ln \frac{t_c - t_{кон}}{t_c - t_{нач}} = \frac{\alpha F}{mC} \Phi_H \quad . \quad (2.27)$$

Длительность нагрева заготовок равна

$$\Phi_H = \frac{mC}{\alpha F} \ln \frac{t_c - t_{кон}}{t_c - t_{нач}} \quad . \quad (2.28)$$

При известном времени нагревания конечную температуру материала можно рассчитать по формуле

$$t_{кон} = t_c - (t_c - t_{нач}) e^{-\frac{\alpha \tau_H F}{mC}}, \quad ^\circ\text{C} \quad . \quad (2.29)$$

Расчет длительности нагрева в методических печах за счет лучистого теплообмена

Воспользуемся равенством уравнений теплового баланса и теплообмена

$$dQ_6 = m c dt ; \quad (2.30)$$

$$dQ_T = \varepsilon_{\text{пр}} F C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] d\tau , \quad (2.31)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты лучеиспускающей и лучевоспринимающей поверхности; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$; F – поверхность лучистого теплообмена, м^2 .

Преобразуем уравнение (2.31) таким образом, чтобы его можно было использовать для получения конечного выражения. Для этого разделим правую часть уравнения на $\left(\frac{T_1}{100} \right)^4$, тогда уравнение приобретает следующий вид

$$dQ_T = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} F C_0 T_1^4}{100^4} \left[1 - \frac{T^4}{T_1^4} \right] d\phi . \quad (2.32)$$

Обозначим $\frac{T}{T_1} = \eta$ и подставим в выражение (2.32), тогда

$$dQ_T = \frac{C_0 \varepsilon_{\text{пр}} F}{T_1^4} [1 - \eta^4] d\phi . \quad (2.33)$$

После разделения переменных получим уравнение

$$\int_{\eta_H}^{\eta_K} \frac{d\eta}{1 - \eta^4} = \frac{C_0 \varepsilon_{\text{пр}} F T_1^3}{100^4 m c} \int_0^{\phi_H} d\phi . \quad (2.34)$$

Левая часть уравнения (2.34) представляет собой табличный интеграл следующего вида

$$\int_{и_н}^{и_к} \frac{ди}{1-и^4} = \frac{1}{4} \ln \frac{1+Q_к}{1-Q_к} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} и_к - \frac{1}{4} \ln \frac{1+и_н}{1-и_н} - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} и_н . \quad (2.35)$$

Приравнявая $\frac{C_o \epsilon_{пр} F T_1}{100 m c} d\phi$ к уравнению (2.35), получим длительность нагрева материала до заданной температуры

$$\phi_н = \frac{100 m c}{C_o \epsilon_{пр} F T_1^3} \left[\frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T_к}{T_1}}{1 - \frac{T_н}{T_1}} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{T_к}{T_1} - \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \frac{T_к}{T_1}}{1 - \frac{T_н}{T_1}} - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{T_н}{T_1} \right] \quad (2.36)$$

где m – массовый расход материала, кг/ч; C – теплоемкость материала, кДж/(кг·°C); $\epsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; C_o – степень черноты абсолютно черного тела, $C_o=5,67$ Вт/(м²·K⁴); $T_н$, $T_к$ – абсолютная температура тела (начальная и конечная), К; T_1 – абсолютная температура излучения, К; F – поверхность лучистого теплообмена, м².

Решая полученное уравнение (2.36) можно определить длительность нагрева заготовок и, соответственно, конструктивные размеры рабочей камеры.

При организации нагрева материала важное значение приобретает соотношение тепловых потоков от среды к материалу (внешний теплообмен) и распространение потоков в самом материале (внутренний теплообмен), которое характеризуется критерием Био.

Из равенства тепловых потоков

$$\delta(t_c - t_n) = \frac{\lambda}{\alpha} (t_n - t_{ц}) \quad (2.37)$$

получаем критерий Био

$$Bi = \frac{\delta \alpha}{\lambda} = \frac{t_n - t_{ц}}{t_c - t_n}, \quad (2.38)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); t_n , $t_{ц}$, t_c – соответственно температуры поверхности, центра материала и окружающей среды, °C; δ – толщина материала, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K).

Если $Bi > 1$, тогда термическое сопротивление материала больше термического сопротивления распространения теплового потока от

среды к материалу и, наоборот, если $Bi < 1$, то термическое сопротивление распространения теплового потока оказывается больше термического сопротивления материала.

Мероприятия по энергосбережению можно намечать только при соответствии и расчете тепловых балансов энергетических и теплотехнологических установок.

Приведем тепловой баланс методической печи.

Тепловой баланс методической печной установки

Уравнение теплового баланса методической печной установки при полном сгорании топлива имеет следующий вид

$$B_T Q_i^d + Q'_{\text{мат}} = Q_{\text{ух}} + Q''_{\text{мат}} + Q_{\text{окр}} . \quad (2.39)$$

Приходные статьи

Теплота, выделившаяся в результате горения топлива

$$Q_T = B_T Q_i^d , \text{ кДж/ч} , \quad (2.40)$$

где B_T – расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Расчетная теплота сгорания топлива

$$Q_p = Q_i^d + C_T t_T + \alpha V_v^0 C_v t_v , \text{ кДж/м}^3 , \quad (2.41)$$

где Q_i^d – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м^3 ; C_T – теплоемкость газообразного топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_T – температура топлива, $^\circ\text{C}$; α – коэффициент избытка воздуха, $\alpha = 1,05-1,10$; V_v^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для горения топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C_v – теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_v – температура дутьевого воздуха, $^\circ\text{C}$.

Теплота, вносимая в печь с материалом

$$Q_M' = G_M C_M t_M' , \text{ кДж/ч} , \quad (2.42)$$

где G_M – массовый расход материала, кг/ч ; C_M – теплоемкость нагреваемого материала, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_M' – начальная температура материала, $^\circ\text{C}$.

Расходные статьи

Потери теплоты с уходящими газами

$$Q_{yx} = B_T [V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V_B^0] C_{yx} t_{yx}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.43)$$

где V_{Γ}^0 – теоретическое количество продуктов сгорания топлива определяется на основании расчетов процессов горения газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α – коэффициент избытка воздуха; V_B^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для горения топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C_{yx} – средняя теплоемкость продуктов сгорания газообразного топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_{yx} – температура уходящих газов, $^\circ\text{C}$; $(\alpha - 1)V_B^0$ – избыточное количество воздуха, которое не вступило в реакцию горения, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\alpha > 1,0$ – окислительная среда; $\alpha < 1,0$ – восстановительная среда.

Потери теплоты с нагретым материалом

$$Q_M'' = G_M C_M t_M'', \text{ кДж/ч}, \quad (2.44)$$

где G_M – производительность печной установки, кг/ч ; C_M – теплоемкость металлических заготовок, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_M'' – температура заготовок на выходе из печной установки, $^\circ\text{C}$.

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения

$$Q_{\text{окр}} = \sum_{i=1}^n F_i k_i \Delta t_i, \text{ кДж/ч}, \quad (2.45)$$

где F_i – поверхность теплообмена i -го элемента ограждения методической печной установки, м^2 ; k_i – коэффициент теплопередачи на i -м элементе, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; Δt_i – температурный напор на i -м элементе, $^\circ\text{C}$.

В связи с большой длиной методической печной установки и различными температурными условиями всю длину печи разбивают на элементарные участки и для них определяют потери теплоты, а затем полученные результаты суммируют.

Подставляя полученные результаты в исходное уравнение (2.39), получим

$$\begin{aligned} B_T Q_p + G_M C_M t_M' = \\ = B_T [V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V_B^0] C_{yx} t_{yx} + G_M C_M t_M'' + \sum_{i=1}^n k_i F_i \Delta t_i, \text{ кДж/ч}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Расход топлива при этом равен

$$B_T = \frac{G_M C_M (t''_M - t'_M) + \sum_{i=1}^n k_i F_i dt_i}{Q_p - [V_\Gamma^0 + (\delta - 1)V_B^0] C_{yx} t_{yx}} \quad , \quad \text{м}^3/\text{ч} \quad . \quad (2.47)$$

В методических печных установках энергосбережение должно производиться в следующих направлениях:

- сокращение потерь теплоты в окружающую среду за счет дополнительной изоляции;
- снижение температуры уходящих газов;
- за счет предварительного подогрева заготовок;
- за счет интенсификации процессов теплообмена и увеличения производительности установок.

Оценку эффективности использования топлива можно произвести по КПД, который равен отношению полезной теплоты на нагревание материала к затраченной теплоте

$$\eta = \frac{G_M C_M (t''_M - t'_M)}{B_T Q_p + G_M C_M t'_M} \cdot 100\% \quad . \quad (2.48)$$

Анализ эффективности использования теплоэнергетических ресурсов можно производить по удельным расходам. Уравнение теплового баланса (2.46) можно представить в следующем виде

$$100\% = \frac{Q_{yx}}{B_T Q_p + Q'_M} 100\% + \frac{Q''_M}{B_T Q_p + Q'_M} 100\% + \frac{Q_{окр}}{B_T Q_p + Q'_M} 100\% \quad (2.49)$$

или

$$100\% = q_{yx} + q''_M + q_{окр} \quad . \quad (2.50)$$

Наиболее распространенным является анализ теплового баланса по затратам теплоты на потери, отнесенные к подведенной теплоте. В свою очередь удельные затраты теплоты сравниваются с затратами на аналогичных установках или сравниваются с нормируемыми показателями.

В результате внедрения инженерных мероприятий по снижению теплоты в установке, перечисленных ранее, рассчитывается расход сэкономленного топлива:

$$\Delta B_\Sigma = \frac{Q_{эк} \eta}{Q_i^r} \quad , \quad \text{м}^3/\text{ч} \quad , \quad (2.51)$$

где $Q_{\text{эк}}$ - количество сэкономленной теплоты за счет внедрения энергосберегающих технологий, кДж/ч; η - КПД генерирующей установки; Q_i^r - низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³.

2.4. Известеобжигательные печи

В соответствии со схемой производства сульфатной целлюлозы образующийся в цехе регенерации и каустизации известковый шлам (CaCO_3) подвергается обжигу в известерегенерационных барабанных вращающихся печах. В схему дополнительно подается известь для компенсации потерь химикатов. Примерный химический состав обжигаемого сырья, : $\text{CaCO}_3 \rightarrow 76,8 - 93,2$; $\text{MgCO}_3 \rightarrow 1,5 - 6$; $\text{Na}_2\text{O} \rightarrow 0,6 - 3,2$; $\text{SiO}_2 \rightarrow 1 - 3,5$; $\text{R}_2\text{O}_3 \rightarrow 0,7 - 3,5$; $\text{CaO}_{\text{акт}} \rightarrow 3 - 5$.

Известеобжигательная печь состоит из барабана диаметром 2,5-3,6 м, на котором расположены два опорных банджа, зубчатое колесо для вращения барабана, холодной (загрузочной) и горячей (разгрузочной) камеры, горелочных устройств, холодильника извести, бункера сырого шлама и других узлов (рис. 2.9).

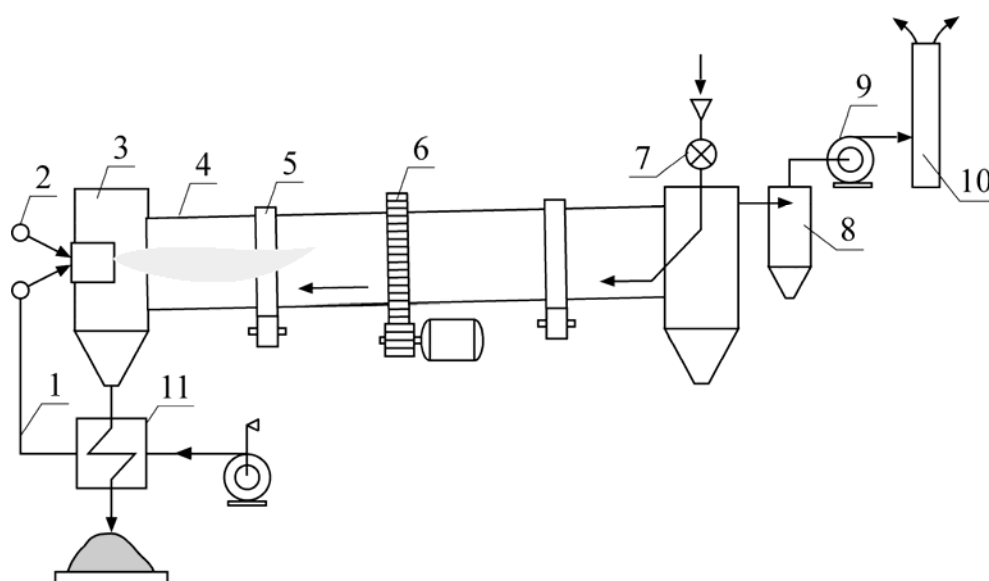


Рис. 2.9. Схема барабанной известеобжигательной печной установки:

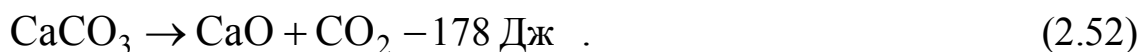
- 1 – дутьевой воздух; 2 – подача мазута; 3 – разгрузочная камера;
- 4 – барабан; 5 – опорный бандаж; 6 – зубчатое колесо; 7 – питатель обжигаемого материала; 8 – циклон; 9 – привод барабана;
- 10 – дымовая труба; 11 – охладитель

При регенерации отработавшей извести во вращающуюся печь подается известковый шлам с влажностью 40-50 %.

Подсушка и увеличение температуры шлама осуществляется в цепной зоне, которая также служит для предупреждения комкообразования.

В качестве топлива применяется мазут различных марок, распыливаемый с помощью механических форсунок, которые способствуют получению длинного высокотемпературного светящегося пламени.

Основной химической реакцией для получения активной извести является эндотермическая реакция разложения карбоната кальция при высокой температуре



Энергосбережение в известеобжигательных печах может осуществляться в нескольких направлениях:

- снижение температуры уходящих газов за счет установки дополнительных воздухоподогревательных или экономайзерных поверхностей нагрева;
- снижение температуры уходящих газов за счет нагревания и подсушки известкового шлама;
- более глубокое охлаждение нагретой извести, выходящей из разгрузочной камеры (до 150-160 °С);
- дополнительная изоляция внутренней поверхности с применением современных термостойких изоляционных материалов;
- ведение оптимального режима горения мазута в камере сгорания с поддержанием минимального коэффициента избытка воздуха, минимизации потерь теплоты с химическим и механическим недожогом;
- устранение присосов холодного воздуха в камеру сгорания и в газоходы установки.

Анализ тепловых потерь целесообразно производить с помощью **уравнения теплового баланса**, которое для известерегенерационной печной установки имеет вид

$$Q_{\text{хр}} + Q_{\text{фт}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{шл}} = Q_{\text{ух}} + Q_{\text{из}} + Q_{\text{хм}} + Q_{\text{окр}} + Q_{\text{энд}} , \text{ кДж/ч.} \quad (2.53)$$

В левой части уравнения представлены приходные статьи, а в правой – расходные.

Приходные статьи

Теплота, выделяющаяся при горении мазута

$$Q_{\text{хр}} = B_T Q_1^r, \text{ кДж/ч}, \quad (2.54)$$

где B_T – расход топлива, кг/ч; Q_1^r – низшая теплота сгорания, кДж/кг.

Физическая теплота топлива

$$Q_{\text{фТ}} = B_T C_T t_T, \text{ кДж/ч}, \quad (2.55)$$

где C_T – теплоемкость мазута, кДж/(кг·°C); t_T – температура мазута, поступающего на горение, °C.

Физическая теплота воздуха

$$Q_{\text{фВ}} = B_T \alpha_T V_B^0 C_B t_B, \text{ кДж/ч}, \quad (2.56)$$

где α_T – коэффициент избытка воздуха, $\alpha_T = 1,05-1,10$; V_B^0 – теоретически необходимое количество воздуха для горения мазута, м³/кг; C_B – теплоемкость воздуха, кДж/(м³·°C); t_B – температура дутьевого воздуха, °C.

Теплота шлама, поступающего в печь

$$Q_{\text{шл}} = G_{\text{шл}} C_{\text{шл}} t_{\text{шл}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.57)$$

где $G_{\text{шл}}$ – расход шлама, кг/ч; $C_{\text{шл}}$ – теплоемкость шлама, кДж/(м³·°C); $t_{\text{шл}}$ – температура шлама, поступающего в печь, °C.

Расходные статьи

Теплота уходящих газов

$$Q_{\text{ух}} = B_T (V_{\text{ух}} \bar{C}_{\text{ух}} t_{\text{ух}} - V_B^0 C_B t_B), \text{ кДж/ч}, \quad (2.58)$$

где $V_{\text{ух}}$ – объемный расход уходящих газов, м³/кг; V_B^0 – теоретический объем воздуха для горения мазута, м³/кг; $\bar{C}_{\text{ух}}$ – средняя объемная теплоемкость уходящих газов, кДж/(м³·°C); $t_{\text{ух}}$ – температура уходящих газов, °C.

Теплота, уносимая из печной установки вместе с известью

$$Q_{\text{из}} = G_{\text{из}} C_{\text{из}} t_{\text{из}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.59)$$

где $G_{\text{из}}$ – производительность известеобжигательной печи, кг/ч; $C_{\text{из}}$ – теплоемкость извести, кДж/(м³·°C); $t_{\text{из}}$ – температура извести, выгружаемой из печи, °C.

Потери теплоты *от химической и механической неполноты сгорания*

$$Q_{x+m} = B_T (q_x + q_m) , \text{ кДж/ч} , \quad (2.60)$$

где q_x – удельные потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива; q_m – удельные потери теплоты от механической неполноты сгорания мазута.

Потери теплоты *в окружающую среду* от нагретых поверхностей нагрева печной установки

$$Q_{окр} = k F \Delta t , \text{ кДж/кг} , \quad (2.61)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; F – поверхность теплообмена, м^2 ; t – температурный напор, $^\circ\text{C}$.

Потери теплоты *в результате протекания эндотермических реакций* $Q_{энд}$

$$Q_{энд} = G_M q_{энд} , \text{ кДж/ч} , \quad (2.62)$$

где G_M – расход материала, кг/ч ; $q_{энд}$ – удельная теплота эндотермической реакции, кДж/кг .

Для анализа тепловых потерь уравнение теплового баланса можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} 100 \% = & \frac{V_T \cdot (t_{yx} - t_{окр}) \cdot c \cdot c_{yx}}{Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{G_{из} \cdot C_{изв} \cdot t_{изв}}{B_T \cdot Q_i^r} \cdot 100 \% + \\ & + \frac{k \cdot F \cdot dt}{B_T \cdot Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_{энд}}{B_T \cdot Q_i^r} \cdot 100 \% - \frac{G_{шл} c_{шл} t_{шл}}{B_T \cdot Q_i^r} \cdot 100 \% \end{aligned} \quad (2.63)$$

или то же уравнение в относительных единицах

$$100 \% = q_{yx} + q_{изв} + q_{x+m} + q_{окр} + q_{энд} - q_{шл} , \% . \quad (2.64)$$

Полученные величины тепловых потерь сравниваются с нормируемыми значениями, на основании которых принимаются соответствующие решения по внедрению мероприятий для сокращения потерь теплоты и увеличения КПД известерегенерационной печной установки.

Энергосбережение в известерегенерационных печах можно осуществить в следующих направлениях:

- снижение потерь теплоты с уходящими газами;
- поддержание температурного графика обжига по длине печи для получения качественной извести (без пережога);

- снижение тепловых потерь в окружающую среду через футеровку за счет дополнительной изоляции барабана и других теплоотдающих поверхностей;
- глубокое охлаждение извести;
- снижение потерь от химической и механической неполноты сгорания;
- уменьшение влажности шлака, поступающего в печь.

Тогда экономию топлива можно рассчитать по следующей формуле

$$B_T = \frac{\sum Q}{Q_i^r} \eta, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2.65)$$

где $\sum Q$ – расход сэкономленной теплоты, кДж/ч; Q_i^r – низшая теплота сгорания мазута, кДж/кг; η – КПД выработки тепловой энергии.

2.5. Туннельные печи

Туннельные печные установки представляют собой высокотемпературные теплотехнологические аппараты для обжига кирпича, керамики, фарфора и др. В результате воздействия высокой температуры на изделия происходит значительное изменение структуры материала, теплопроводности и других свойств изделий.

Туннельная печь включает в себя: теплоизолированный туннель; вагонетки, на которых выкладывается садка; толкатели; тягодутьевое оборудование; горелки и другие узлы, обеспечивающие необходимый температурный режим работы печи и получение высококачественной продукции.

На рис. 2.10а показана тепловая схема туннельной печной установки и температурный график по длине туннеля (рис. 2.10б).

Туннель изолирован теплоизоляционными материалами различной толщины по длине туннеля в зависимости от температурного режима: хромомгнезитовым кирпичом в зоне обжига, красным кирпичом в низкотемпературной области.

Туннельная печь обладает высокой экономичностью в связи с тем, что теплота, затраченная на обжиг материала, возвращается в цикл для нагревания поступившего в печь материала, а затем теплота нагретого материала передается воздуху для горения топлива.

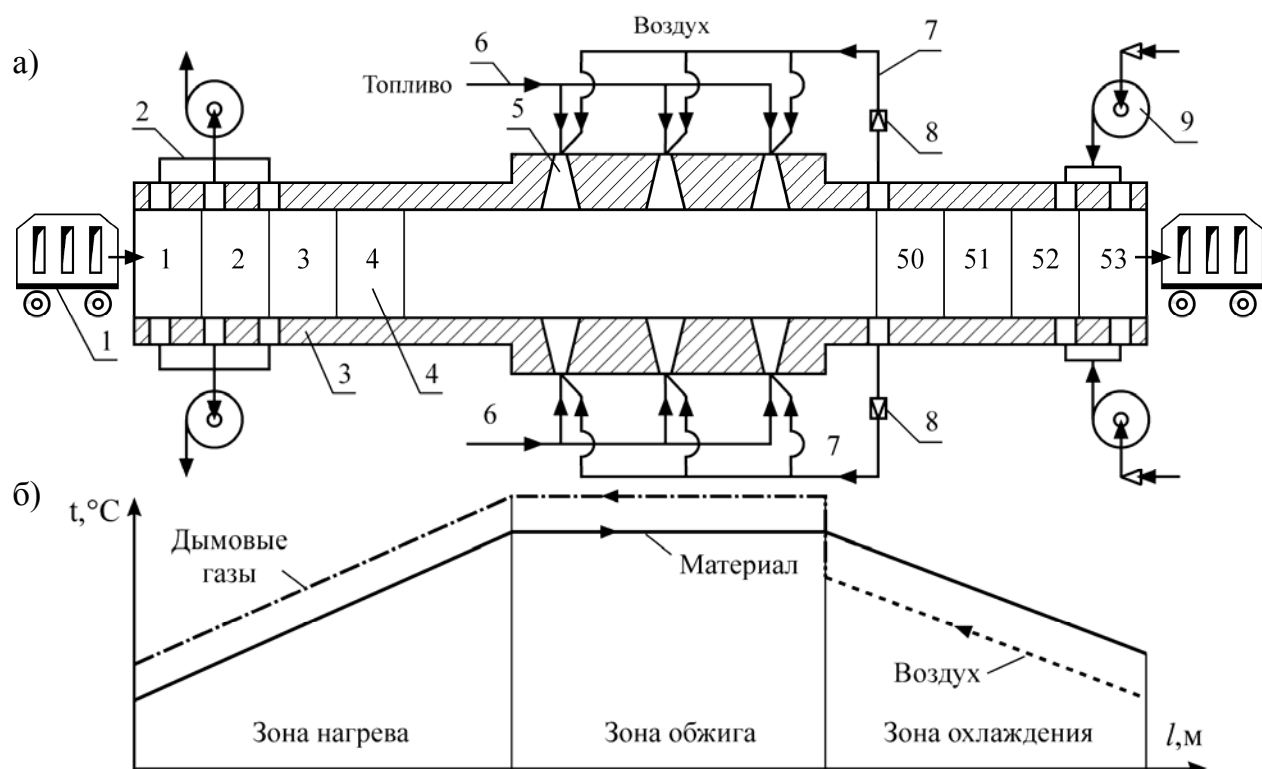


Рис. 2.10. Тепловая схема туннельной печной установки (а), а также температурные графики материала $t_m = f(x)$, воздуха $t_{\text{возд}} = f(x)$ и продуктов сгорания $t_r = f(x)$ (б):
 1 – вагонетка с материалом; 2 – отработавшие продукты сгорания;
 3 – туннель; 4 – положение вагонетки в туннеле; 5 – газовая горелка;
 6 – газообразное топливо; 7 – первичный воздух; 8 – эжектор;
 9 – дутьевой вентилятор

Обжигаемый материал выкладывается на подине вагонетки таким образом, чтобы обеспечить устойчивое положение садки на вагонетке и, кроме того, максимальную поверхность теплообмена для обтекания продуктами сгорания.

По истечении некоторого времени с одного конца туннеля вагонетка закатывается, а с другого конца вагонетка с готовой продукцией выкатывается.

Поток воздуха для горения газообразного топлива подается со стороны горячего конца туннеля, обтекает материал, нагревается и частично подается в качестве первичного воздуха, а остальной воздух используется в горении в качестве вторичного воздуха, подаваемого по туннелю.

В отличие от котельных установок в туннельных печах на боковых стенках в зоне обжига устанавливается большее количество горелок низкой производительности, с помощью которых

производится количественное регулирование температурного режима работы печи, включая и выключая сразу несколько горелок. Отрабатывшие газы с температурой 140-150 °С удаляются с противоположной стороны туннеля.

На рис. 2.11 показан разрез туннеля с вагонеткой, обжигаемым материалом, газовыми горелками, ходовой частью вагонетки.

Для предотвращения попадания высокотемпературных газов в нижнюю часть туннеля на внутрипечных боковых стенках туннеля устанавливают ящики с песком, в которые опущены ножи, закрепленные на подине вагонетки.

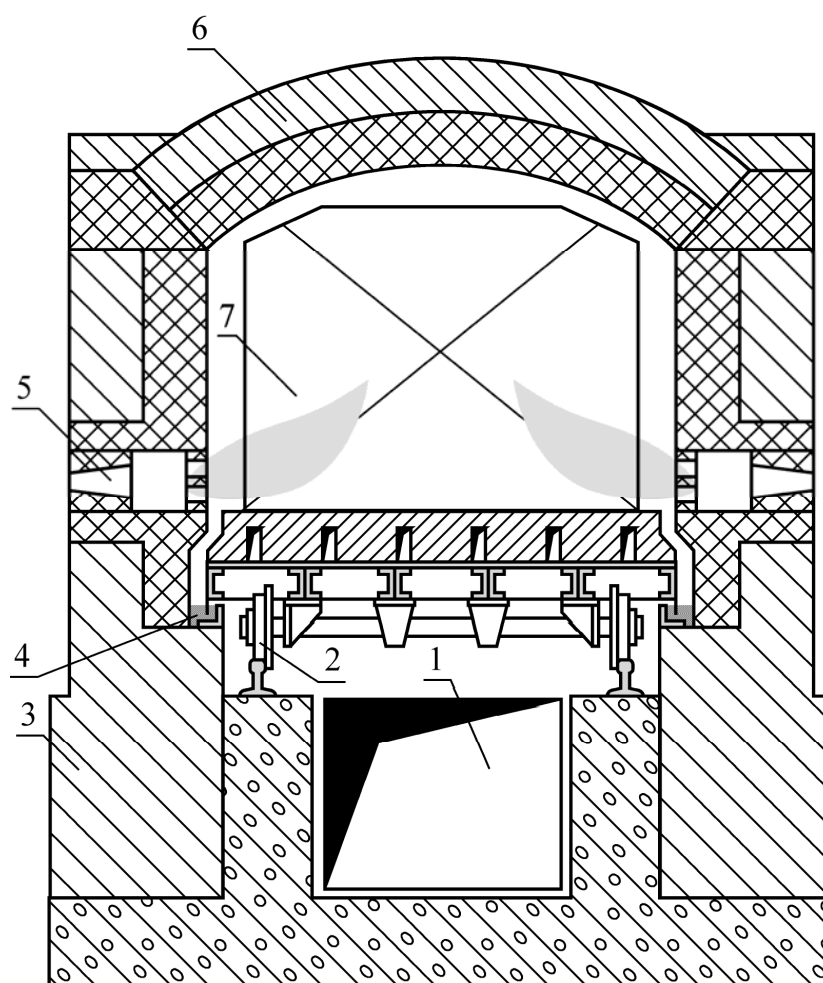


Рис. 2.11. Поперечный разрез туннеля:

- 1 – смотровой канал; 2 – ходовая часть вагонетки;
- 3 – обмуровка туннеля; 4 – песочный затвор; 5 – горелка;
- 6 – свод; 7 – обжигаемый материал

На рис. 2.10б приведены графики изменения температуры материала (кривая с точками) и воздуха, а после зоны горения –

дымовых газов, в соответствии с которыми всю длину туннеля можно разделить на три зоны:

- зону нагрева материала (она же зона охлаждения продуктов сгорания);
- зону обжига, в которой материал приобретает максимальную температуру;
- зону охлаждения материала (она же зона нагревания воздуха).

Уровень температурного режима выбирается в зависимости от физико-химических свойств обжигаемого материала.

Тепловой баланс туннельной печной установки

На рис. 2.12 приведена схема тепловых потоков туннельной печной установки, на основании которой составлено уравнение теплового баланса в общем виде (при полном сгорании топлива)

$$Q_{\text{хр}} + Q'_{\text{м}} + Q'_{\text{тр}} + Q'_{\text{экз}} = Q''_{\text{ух}} + Q''_{\text{м}} + Q''_{\text{тр}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{окр}}, \text{ кДж/ч.} \quad (2.66)$$

Левая часть уравнения представляет собой приходные статьи в тепловом балансе, а правая – расходные статьи, которые между собой равны.

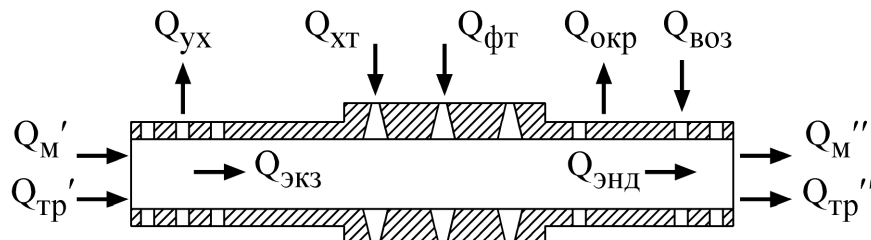


Рис. 2.12. Схема туннельной печной установки для расчета теплового баланса с обозначением тепловых потоков

Приходные статьи

Теплота, выделяющаяся в результате химической реакции при горении топлива

$$Q_{\text{хр}} = B_{\text{т}} Q_{\text{р}} = B_{\text{т}} (Q_1^{\text{r}} + c_{\text{т}} t_{\text{т}} + \alpha V_{\text{в}}^0 c_{\text{в}} t_{\text{в}}), \text{ кДж/ч,} \quad (2.67)$$

где $B_{\text{т}}$ – расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{\text{р}}$ – рабочая расчетная теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; Q_1^{r} – низшая теплота сгорания топлива по рабочей массе, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $c_{\text{т}}$ – теплоемкость топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{т}}$ – температура топлива, $^\circ\text{C}$; α – коэффициент избытка воздуха; $V_{\text{в}}^0$ –

теоретическое количество воздуха, необходимое для горения топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, подаваемого на горение топлива, $^\circ\text{С}$.

Теплота, вносимая в печь с материалом

$$Q'_{\text{м}} = G_{\text{м}} c_{\text{м}} t'_{\text{м}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.68)$$

где $G_{\text{м}}$ – производительность туннельной печи, кг/ч ; $c_{\text{м}}$ – теплоемкость обжигаемого материала, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$; $t'_{\text{м}}$ – температура поступающего в печь материала, $^\circ\text{С}$.

Теплота, поступающая в печь с транспортными устройствами

$$Q'_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} t_{\text{тр}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.69)$$

где $G_{\text{тр}}$ – расход транспортных средств, кг/ч ; $c_{\text{тр}}$, $t_{\text{тр}}$ – теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$, и температура, $^\circ\text{С}$, транспортных средств.

Теплота, выделяющаяся в туннеле в результате протекания экзотермических реакций

$$Q_{\text{экз}} = G_{\text{м}} q_{\text{экз}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.70)$$

где $q_{\text{экз}}$ – удельная теплота экзотермических реакций, кДж/кг .

Расходные статьи

Потери теплоты с уходящими газами

$$Q_{\text{yx}} = V_{\text{т}} \left[V_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) V_{\text{в}}^0 \right] c_{\text{yx}} t_{\text{yx}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.71)$$

где $V_{\text{г}}^0$ – теоретический объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $V_{\text{в}}^0$ – теоретический объем воздуха для горения топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α – коэффициент избытка воздуха; c_{yx} – средняя теплоемкость продуктов сгорания топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$; t_{yx} – температура уходящих газов, $^\circ\text{С}$.

Потери теплоты с нагретым материалом

$$Q''_{\text{м}} = G_{\text{м}} c_{\text{м}} t''_{\text{м}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.72)$$

где $t''_{\text{м}}$ – температура материала на выходе из туннеля, $t_{\text{м}} = 50-60 \text{ } ^\circ\text{С}$.

Потери теплоты с транспортными устройствами

$$Q''_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} t''_{\text{тр}}, \text{ кДж/ч}, \quad (2.73)$$

где $G_{\text{тр}}$ – расход транспортных средств, кг/ч ; $c_{\text{тр}}$ – средняя теплоемкость транспортных средств, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$; $t''_{\text{тр}}$ – температура транспортных средств на выходе из туннеля, $^\circ\text{С}$.

Потери теплоты *от протекания эндотермических реакций*

$$Q_{\text{энд}} = G_{\text{м}} q_{\text{энд}} , \text{ кДж/ч} , \quad (2.74)$$

где $q_{\text{энд}}$ – удельная теплота эндотермических реакций, кДж/кг.

Потери теплоты *в окружающую среду*

$$Q_{\text{окр}} = \sum_1^n F_i k_i \Delta t_i , \text{ кДж/ч} , \quad (2.75)$$

где F_i – поверхность теплообмена расчетного участка, м^2 ; k_i – коэффициент теплопередачи, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt_i – температурный напор на расчетном участке, $^\circ\text{C}$.

Подставив в уравнение (2.66) полученные значения приходных и расходных статей, выразим расход топлива

$$B_{\text{т}} = \frac{G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t''_{\text{м}} - t'_{\text{м}}) + G_{\text{тр}} \cdot c_{\text{тр}} \cdot (t''_{\text{тр}} - t'_{\text{тр}}) + G_{\text{м}} \cdot q_{\text{энд}} - G_{\text{м}} \cdot q_{\text{экз}}}{Q_{\text{р}} - [V_{\text{г}}^0 + (\delta - 1) \cdot V_{\text{в}}^0] \cdot c_{\text{ух}} \cdot t_{\text{ух}}} , \text{ м}^3/\text{ч} . \quad (2.76)$$

Эффективность использования топлива в туннельной печной установке можно определить по удельным затратам топлива на единицу выпускаемой продукции

$$b_{\text{т}} = \frac{B_{\text{т}}}{G_{\text{м}}} , \text{ кг топлива/кг продукции} \quad (2.77)$$

или по затраченной тепловой энергии на единицу выпускаемой продукции

$$q_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{р}} \cdot B_{\text{т}}}{G_{\text{м}}} , \text{ ГДж/тону продукции} . \quad (2.78)$$

КПД, представляющий собой отношение полезной теплоты к затраченной, для туннельной печной установки равен

$$\eta_{\text{тх}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{зат}}} \cdot 100 \% = \frac{G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t''_{\text{м}} - t'_{\text{м}}) + G_{\text{м}} \cdot q_{\text{экз}}}{B_{\text{т}} \cdot Q_{\text{р}} - L_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{в1}} - t_{\text{в0}})} \cdot 100 \% . \quad (2.79)$$

Расчет длительности нагрева материала в туннельной печной установке

На рис. 2.13 показана схема вагонетки и садки, расположенной на подине. К садке предъявляются повышенные требования в отношении ее устойчивости, потому что при очередном продвижении эшелона по

туннелю садка может разрушиться и печь может оказаться в аварийной ситуации.

С другой стороны, садка должна быть выполнена таким образом, чтобы материал имел максимальную открытую поверхность для обтекания ее высокотемпературными продуктами сгорания.

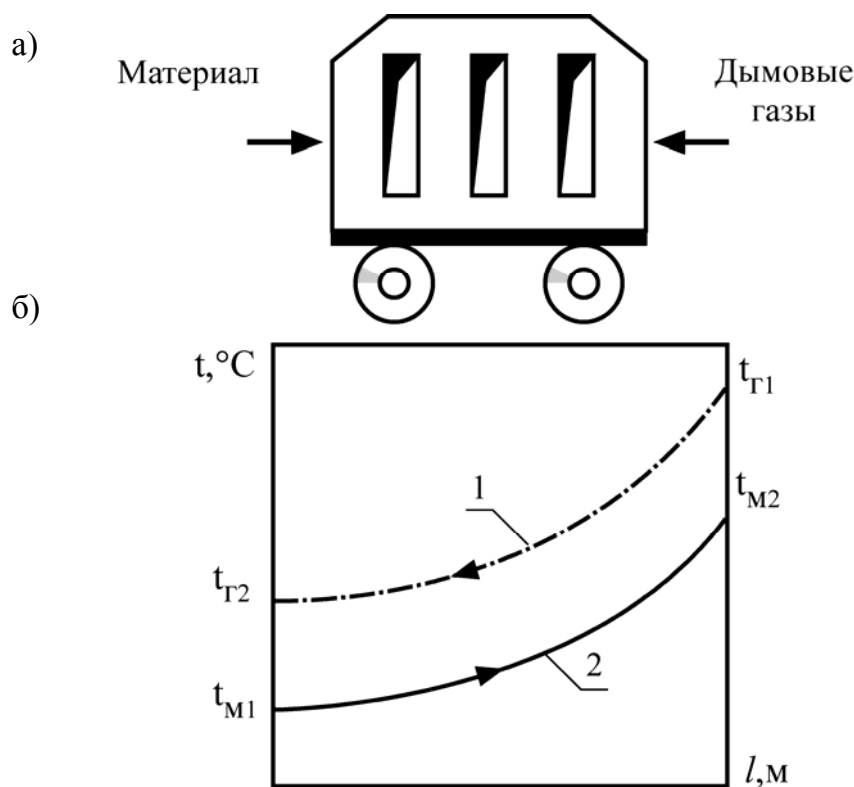


Рис. 2.13. Схема садки (а) и температурный график (б):

1 - охлаждение продуктов сгорания; 2 - нагревание материала

Для определения длительности нагревания садки воспользуемся равенствами уравнения теплового баланса и теплообмена

$$G_M c_M dt = \bar{\alpha} F (t - t_G) d\tau. \quad (2.80)$$

В уравнении (2.80) разделим переменные и проинтегрируем в пределах температур от начальной t_H до конечной t_K и в пределах длительности от нуля до длительности нагрева τ_H

$$\int_{t_H}^{t_K} \frac{dt}{t - t_T} = \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{G_M \cdot c_M} \int_0^{\tau_H} d\tau \quad \text{или} \quad \ln \frac{\bar{t}_G - t_{M1}}{\bar{t}_G - t_{M2}} = \frac{\bar{\alpha} \cdot F}{G_M \cdot c_M} \cdot \tau_H. \quad (2.81)$$

Длительность нагревания материала равна

$$\Phi_H = \frac{G_M \cdot C_M}{\bar{\alpha} \cdot F} \cdot \ln \frac{\bar{t}_r - t_{M1}}{\bar{t}_r - t_{M2}}, \quad (2.82)$$

где $\bar{t}_r$ – средняя температура продуктов сгорания, $\bar{t}_r = \frac{t_{r1} + t_{r2}}{2}$, °C;

t_{r1} и t_{r2} – температуры продуктов сгорания на входе в садку и на выходе из нее, °C; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к нагреваемому материалу, включая теплообмен излучением, кДж/(м²·ч·°C); F – открытые поверхности теплообмена материала, м²; C_M – теплоемкость материала, кДж/(кг·°C); t_{M1} и t_{M2} – температуры материала в начале и в конце расчетного участка, °C; G_M – часовая производительность печной установки, кг/ч.

Аналогичным образом рассчитывается длительность охлаждения материала в зоне снижения температуры материала и нагревания воздуха.

Энергосбережение в туннельных печах может осуществляться за счет снижения тепловых потерь при горении топлива и в окружающую среду футеровки, а также использования теплоты нагретого материала.

2.6. Электрические печи

Электрическая печь – это высокотемпературная теплотехнологическая установка, в которой теплота в рабочем пространстве выделяется за счет протекания электрического тока через твердые, жидкие или газообразные проводники с целью организации тех или иных технологических процессов.

Большое распространение получили следующие виды электрических печей:

- печи сопротивления;
- дуговые печи;
- индукционные печи.

По температуре в рабочей камере различают следующие виды печных установок:

- низкотемпературные (до 1000 °C);
- среднетемпературные (в диапазоне 1000-1500 °C);
- высокотемпературные (более 1500 °C).

Электрическая печь сопротивления (рис. 2.14) – это тепломассообменная установка, в которой теплота выделяется при прохождении электрического тока по проводникам с активным сопротивлением (электрическая плитка, электрическая лампа накаливания и др.).

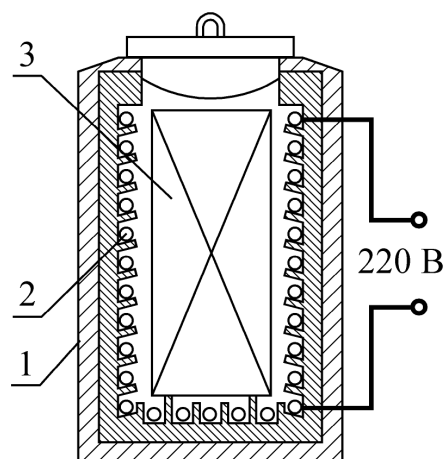


Рис 2.14. Схема электрической печной установки сопротивления:
1 – футеровка печи; 2 – нагревательный элемент; 3 – материал

Перевод одних размерностей тепловых величин в другие производится следующим образом

$$1 \text{ кВт} = 860 \text{ ккал/ч} \cdot 4,19 = 3600 \text{ кДж/ч} \cdot 3600 / (3600 \cdot 1000) = \text{Дж/с} = 1 \text{ Вт} \cdot 1000 = 1 \text{ кВт}.$$

Расчет печей сопротивления заключается в определении длины проводников для получения необходимой мощности.

Мощность печи сопротивления рассчитывается по уравнению теплового баланса с учетом затрат теплоты на нагревание изделия и его плавление, а также потерь теплоты в окружающую среду.

Уравнение тепловой мощности печной установки сопротивления имеет следующий вид

$$Q_6 = 3,6 [G_m c_m (t_{пл} - t_n) + \lambda_{пл} + Q_{окр}] , \text{ Вт} , \quad (2.83)$$

где G_m – производительность печи, кг/ч; c_m – теплоемкость материала, кДж/(кг °С); t_n , $t_{пл}$ – начальная температура материала и его температура плавления, °С; $\lambda_{пл}$ – теплота плавления, кДж/кг.

Потери теплоты в окружающую среду можно рассчитать по уравнению Ньютона – Рихмана

$$Q_{окр} = 3,6 \alpha F (t_p - t_{окр}) , \text{ Вт} , \quad (2.84)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, включая излучение, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; 3,6 – коэффициент перевода кДж в Вт ; $t_{\text{п}}$ – температура поверхности печи, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; F – поверхность теплообмена рабочей камеры, м^2 .

Мощность одной фазы

$$N_{\text{ф}} = \frac{Q_{\text{б}}}{3}, \text{ Вт}. \quad (2.85)$$

Сила тока

$$I = \frac{N_{\text{ф}}}{U}, \text{ А}, \quad (2.86)$$

где U – напряжение в сети, В .

Сопротивление нагревателя

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{N_{\text{ф}}}, \text{ Ом}. \quad (2.87)$$

Длина проводника

$$l_{\text{пр}} = \frac{R \cdot f}{\rho}, \text{ м}, \quad (2.88)$$

где f – поперечное сечение проводника, мм^2 ; ρ – удельное сопротивление проводника (для нихрома $\rho = 1,09 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$).

Проверка нагрузки на поверхность проводника производится следующим образом:

- боковая поверхность нагревателя

$$f_{\text{б}} = \pi d_{\text{пр}} l_{\text{пр}}, \text{ см}^2; \quad (2.89)$$

- удельная боковая нагрузка

$$N_{\text{уд}} = \frac{N_{\text{ф}}}{f_{\text{б}}}, \text{ Вт/см}^2. \quad (2.90)$$

Для неизолированных нагревателей удельная боковая нагрузка должна быть $N_{\text{уд}} \leq 3,5 \text{ Вт/см}^2$, для изолированных нагревателей $N_{\text{уд}} \leq 2,0 \text{ Вт/см}^2$.

Дуговые печи нагреваются электроэнергией, преобразуемой в тепловую в одной или нескольких дугах (рис. 2.15). В рабочей камере печи можно получать температуру более 1500°C . Дуговые печи широкое распространение получили в металлургической промышленности для получения стали высокого качества и в химической

промышленности для получения минеральных удобрений. Принцип работы дуговой печи основан на получении электрической дуги между угольными электродами, напоминающей дугу при коротком замыкании проводников. Дуговые печи потребляют значительные мощности, поэтому их выполняют трехфазными с тремя электродами. Рабочий объем печи состоит из рабочего пространства и ванны, которая имеет сферическое днище. В качестве изоляции применяется магнезитовый и шамотный кирпич.

В *индукционных печах* нагрев материала производится путем возбуждения в токопроводящих телах электрических токов переменным электрическим полем. Для создания электрического поля используется ток низкой частоты (50 Гц), средней (до 10 кГц) и высокой (свыше 10 кГц). Такие печи применяются для плавления металлов, поверхностной закалки деталей и других процессов.

На рис. 2.16 показана схема индукционной печи, состоящая из теплоизолированного тигля, обмотки, охватывающей тигель и электрической схемы. При прохождении тока по обмотке возникает электрическое поле, которое возбуждает ток в нагреваемом материале, который в свою очередь превращается в теплоту.

Этот способ нагрева изделий и их плавления весьма дорогостоящий, поэтому применяется для ответственной термической обработки материалов и изделий.

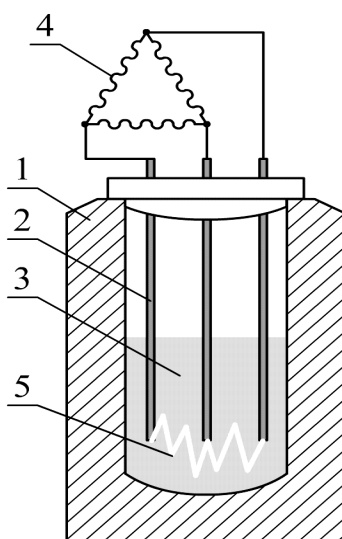


Рис. 2.15. Дуговая электрическая печь:

1 – футеровка; 2 – графитовые стержни; 3 – обрабатываемый материал; 4 – трансформатор; 5 – электрическая дуга

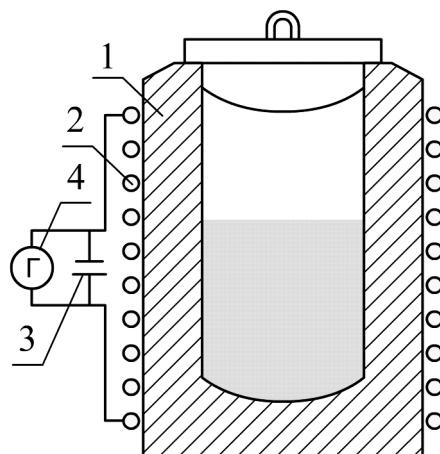


Рис. 2.16. Индукционная печь:

1 – обмотка печи; 2 – футеровка печи; 3 – конденсатор;
4 – генератор

Необходимо отметить, что нагрев и плавление материалов электрическим током с энергетической точки зрения является дорогостоящим процессом, так как КПД выработки электрической энергии 20-40 % (в зависимости от схемы тепловой станции). Кроме того, при обратном превращении электрической энергии в тепловую потери составляют 40-50 %, по этой причине коэффициент использования топлива снижается до 10-20 %.

Однако, в каждом отдельном случае необходимо учитывать экономическую целесообразность применения электрической энергии: для получения тепловой энергии; для увеличения производительности установок; повышения качественных показателей выпускаемой продукции; снижения загрязнения воздушного и водного бассейна и других факторов.

Инженер-теплоэнергетик должен уметь рассчитывать расходы теплоты и топлива для различных способов термической обработки материалов и производить их анализ, определять экономическую эффективность каждого способа.

3. Энерготехнологическое использование топлива

3.1. Термическая переработка твердого топлива

Термическая переработка твердого топлива является значительным резервом экономии топливно-энергетических ресурсов, которая до настоящего времени мало реализуется, но в перспективе имеет большие возможности в обеспечении промышленности и жилищно-коммунального хозяйства различными видами энергии. Кроме того, в результате энерготехнологической переработки твердого и жидкого топлив можно получать бензин, керосин и различные масла.

Существует несколько способов термической переработки твердого топлива:

- сухая перегонка;
- полукоксование;
- коксование;
- гидрогенизация;
- газификация.

Сухая перегонка древесины относится к термической переработке твердого топлива путем его нагревания до температуры 100-300 °С без доступа воздуха с образованием окиси углерода CO, метана CH₄, водорода H₂, разнообразных жидких продуктов и твердого остатка в виде кокса.

Газы и жидкие продукты выделяются в виде парогазовой смеси, при охлаждении которой образуются жидкие и отстойные смолы, а при дальнейшей переработке полуфабрикатов получают бензин, керосин и различные масла.

Содержание летучих веществ в процентах от массы горючей массы составит, %, для:

- древесины $V^d = 85$;
- торфа $V^d = 74$;
- бурых углей $V^d = 30-60$;
- каменных углей $V^d = 8-50$;
- антрацита $V^d = 3-7$.

Температура начала термического разложения зависит от возраста топлива. Чем моложе топливо, тем при более низкой температуре начинается разложение, которое для древесины равно 100-160 °С; для бурых углей – 130-170 °С; для каменных углей – 170-300 °С.

Полукоксование твердого топлива, назначение которого заключается в получении из бурых углей и горючих сланцев первичной смолы, газа и твердого остатка (полукокса). Из первичной смолы получают бензин и различные моторные топлива, смазочные масла, фенолы и другие вещества. Процесс полукоксования ведут при невысокой температуре, чтобы избежать разложения жидких углеводородов на более простые с выделением метана CH_4 , этила C_2H_4 и других соединений.

Для топлив с большим выходом летучих горючих веществ (торфа, сланцев и бурых углей) наиболее целесообразным является его комплексное энерготехнологическое использование, разработанное российскими энергетиками.

Схема станции полукоксования приведена на рис. 3.1. Топливо сначала поступает в цех подготовки, где происходит его дробление, грохочение и обеспыливание. Далее топливо направляется в термический цех, где в результате нагревания получают полукокк, смолу и полукоксовый газ (газообразные продукты).

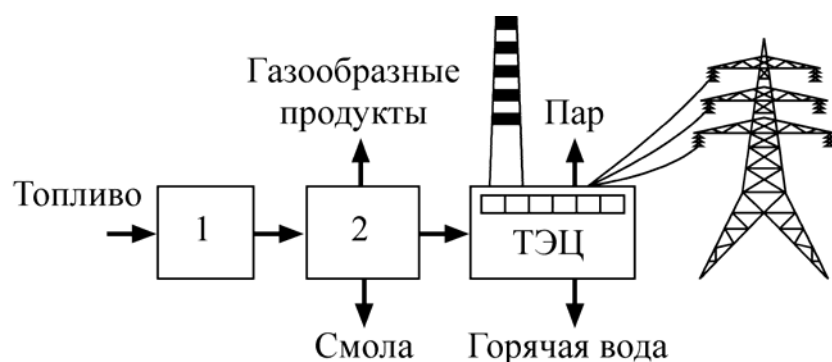


Рис. 3.1. Схема энерготехнологического использования твердого топлива (полукоксования):

1 – цех подготовки топлива; 2 – цех термической переработки топлива

Полукокк направляется в котельную и используется как топливо для получения пара, горячей воды и электроэнергии. Смола перекачивается в химический цех, где подвергается разгонке по фракциям с получением бензина, лигроина, керосина, смазочных масел и остатка – смоляного пека.

Полукоксовый газ после очистки и охлаждения направляется в городскую сеть для бытовых нужд населения или для промышленных предприятий.

Полукоксование осуществляется в ретортах с внешним или внутренним обогревом без доступа воздуха. На рис. 3.2 приведена схема такой установки для полукоксования с внешним обогревом. Реторты собираются в батареи, между которыми проходят высокотемпературные газы и нагревают топливо. Недостатком внешнего обогрева реторт является высокая температура стенок реторт, из-за чего происходит разложение жидких продуктов, что несколько снижает их качество.

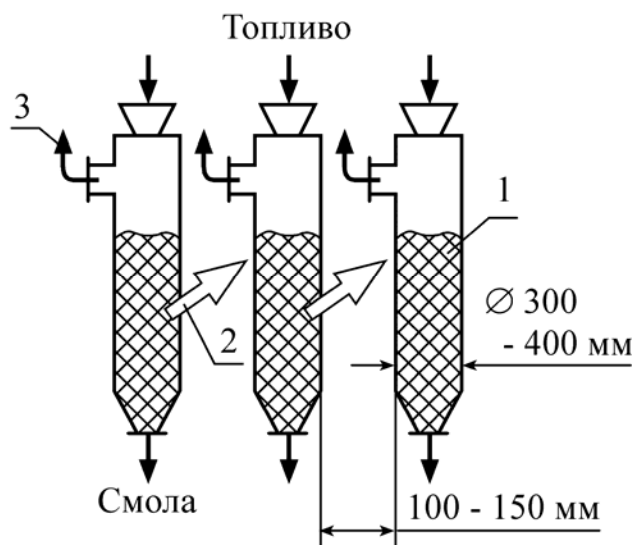


Рис. 3.2. Батарея для полукоксования и коксования топлива:

1 – топливо; 2 – высокотемпературные продукты сгорания;
3 – коксовый горючий газ

При внутреннем обогреве высокотемпературные газы фильтруются сквозь слой топлива, нагревая его. Однако такой способ нагрева топлива связан с высоким аэродинамическим сопротивлением слоя топлива и выносом большого количества пыли газовым потоком.

Коксование твердого топлива в коксохимической промышленности широко применяется с целью получения кокса для доменных печей, литейных вагранок и других теплотехнических установок.

На рис. 3.3 приведена схема коксования каменного угля, состоящая из дробления, грохочения, обеспыливания и обогащения. Последней стадией переработки является нагревание топлива в ретортах высокотемпературными дымовыми газами.

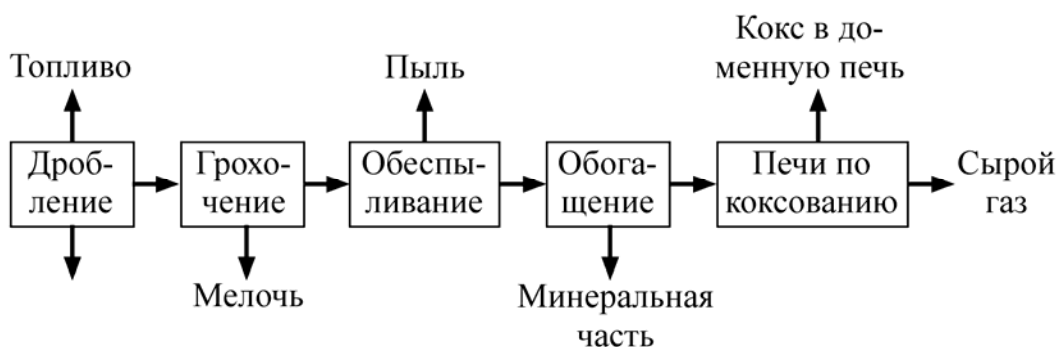


Рис. 3.3. Технологическая схема коксования твердого топлива

Кокс – искусственное топливо для металлургической промышленности, он применяется для выплавки чугуна в доменных печах. Кокс в основном состоит из углерода и золы. После подготовки угля выход кокса составляет 75-80 % от массы исходного топлива. Продолжительность коксования 12-16 часов, коксовая батарея состоит из 45-65 камер шириной 400 мм, длиной 18 м и высотой 4 м.

В 1м³ сырого газа содержится около 100 г смолы, из которой получают аммиак, цианистые соединения и сероводород.

Смола содержит бензол, среднее масло, тяжелое масло, антрацитовое масло, пек.

Требования к металлургическому коксу приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Требования к металлургическому коксу

Показатели	Норма
Содержание влаги W^r , %, не более	4,0
Содержание золы A^r , %, не более	10-12
Содержание серы S^r	0,5-1,4
Выход летучих веществ V^{daf} , %, не более	1,5
Размер кусков, мм	40
Теплота сгорания кокса, кДж/кг (ккал/кг)	2300-2700 (5500-6500)

Гидрогенизация (гидрирование) твердого топлива состоит из обработки твёрдого топлива (бурых углей, каменных углей, сланцев) водородом при высоких температурах (400-600 °С) и давлениях 250-700 ата в присутствии катализаторов. При гидрогенизации

происходит деструкция органической части исходного топлива и превращение её в новые жидкие, газообразные и твёрдые продукты, обогащенные водородом, например, в синтез-газ ($m\text{CO} + n\text{H}_2$), как правило, 50/50 %.

В качестве катализаторов используют композиции с активаторами, включающими железо, хром и другие.

Данный способ термической переработки твёрдого топлива пока не нашёл применения в промышленности, но в будущем займёт определённое место в энергообеспечении страны.

Газификация твёрдого топлива – это термохимический процесс превращения органической части массы топлива в горючий газ путём частичного её окисления дутьём в газогенераторах.

Полученные таким образом газы содержат горючий газ, водяные пары и частицы несгоревшего топлива (унос).

Устройства, в которых происходит газификация топлива, называются газогенераторами, классифицировать которые можно по следующим признакам:

- по роду протекающего процесса (для получения воздушного газа, пароводяного газа, смешанного газа, водяного газа и др.);
- по характеру слоя (с плотным слоем, с взвешенным слоем, с кипящим слоем);
- по давлению (атмосферные, среднего давления, высокого давления);
- по степени механизации процессов (немеханизированные, механизированные);
- по способу образования шлака (с твёрдым шлакоудалением, с жидким шлакоудалением);
- по конструктивным характеристикам (с швельшахтой, без швельшахты);
- по направлению движения топлива и газа (прямоточные, противоточные).

Классификация генераторного газа приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Классификация генераторного газа

Наименование газа	Окислитель	$Q^r_{i,}$ кДж/м ³	Назначение
Воздушный газ	Воздух	4000	Химическое сырьё
Паровоздушный газ	Воздух + пар	5500	Топливо для печей
Парокислородный газ	Кислород + пар	10000	Химическое сырьё
Водяной	Пар	10000	Для сварки

На рис. 3.4 приведена принципиальная схема газогенератора, представляющая собой шахту, в верхней части которой находится загрузочное устройство с затвором и горловина для отвода искусственного газа; в нижней части шахты расположена колосниковая решётка, вращающаяся чаша с приводом для удаления образовавшегося шлака, а также дутьё.

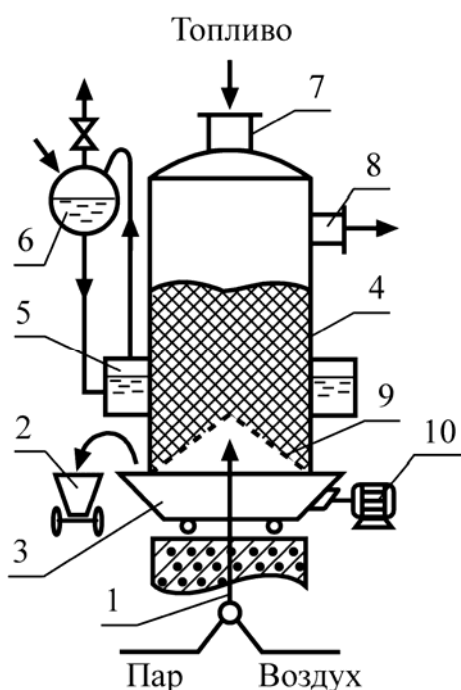


Рис. 3.4. Схема полумеханизированного газогенератора:

- 1 – паровоздушное дутьё; 2 – вагонетка для удаления шлака;
- 3 – вращающаяся чаша; 4 – шахта газогенератора; 5 – рубашка для охлаждения; 6 – барабан испарительного контура; 7 – загрузка топлива; 8 – отвод генераторного газа; 9 – колосниковая решётка; 10 – привод вращающейся чаши

По мере термической обработки топливо постепенно опускается вниз, претерпевая физико-химические превращения и изменения, которые можно условно разделить на следующие зоны:

Первая зона. Зона подсушки топлива и его нагревание.

Вторая зона. Зона сухой перегонки, в которой происходит пирогенетическое разложение органической части топлива с выделением уксусной кислоты и формальдегида, смолы и подсмольной воды.

Кроме того, в этой зоне выделяются летучие горючие вещества (CO , CH_4 , CO_2 , C_mH_n , H_2O , N_2) и другие, которые входят в состав искусственного генераторного газа.

Третья зона называется восстановительной, или зоной газификации, она является основной при получении искусственного газа за счёт восстановления водяных паров в водород H_2 и окись углерода CO в соответствии с реакцией



а также разложения CO_2 с образованием CO



и разложения водяных паров в соответствии с реакцией



Последняя реакция является нежелательной, так как часть углерода окисляется до CO_2 .

Четвёртая зона – окислительная или зона горения, в которой происходит горение части газифицируемого топлива с целью получения высокотемпературных дымовых газов. Их потенциал используется для термического разложения топлива, находящегося в шахте газогенератора.

Горение углерода, водорода и серы протекает в соответствии со следующими реакциями



Пятая зона – зона шлака, в которой происходит охлаждение шлака и нагревание дутья.

В большинстве газогенераторов применяется противоточная схема движения потоков газа и топлива, для которой основное

преимущество заключается в том, что достигается устойчивость процесса газификации за счёт подачи свежего топлива на горящий слой, а недостатком такой схемы является балластировка генераторного газа водяными парами, углекислотой и смолами. Коэффициент избытка воздуха на входе составляет $\alpha = 0,3-0,5$. В зоне швелования происходит выделение летучих веществ, богатых горючими компонентами CO , H_2 , CH_4 и смолами.

В продуктах газификации присутствуют также кислоты, фенолы, воды разложения и другие вещества, которые балластируют генераторный газ. В зоне сушки топлива генераторный газ балластируется испарённой влагой, и температура его снижается до $150-300\text{ }^\circ\text{C}$. Форсированию процесса газификации препятствует вынос мелкой фракции из слоя топлива.

Для прямоточной схемы (схемы с обращённым дутьём) главным преимуществом является чистота генераторного газа, так как он проходит через высокотемпературную зону, в которой сгорают все смолы. Недостаток схемы – необходимость устойчивого подвода тепла в зону сушки и швелования, что усложняет конструкцию газогенератора и его эксплуатацию.

Газогенераторы, работающие на древесных отходах, выпускаются отечественными предприятиями. Коэффициент использования топлива в них составляет $80-90\%$ и относительно низкие капитальные затраты при изготовлении.

Схема газогенераторной станции, приведенная на рис. 3.5, включает в себя приборы для очистки генераторного газа и его охлаждения и состоит из газогенератора, циклона, теплообменника для охлаждения, скруббера и газодувки. Очищенный и охлаждённый генераторный газ подаётся в газопровод.

Газогенераторы могут включаться в тепловую схему ТЭЦ (рис. 3.6).

Полученный горючий газ направляется в топку парогенератора, в результате чего снижаются выбросы в атмосферу окислов азота NO_x в 4 раза, пыли – в 25 раз, углекислого газа CO_2 в 10 раз.

Газогенераторы могут применяться для получения горючего газа, используемого в газотурбинных установках, в которых отработавшие продукты сгорания направляются в котёл-утилизатор (рис. 3.7).

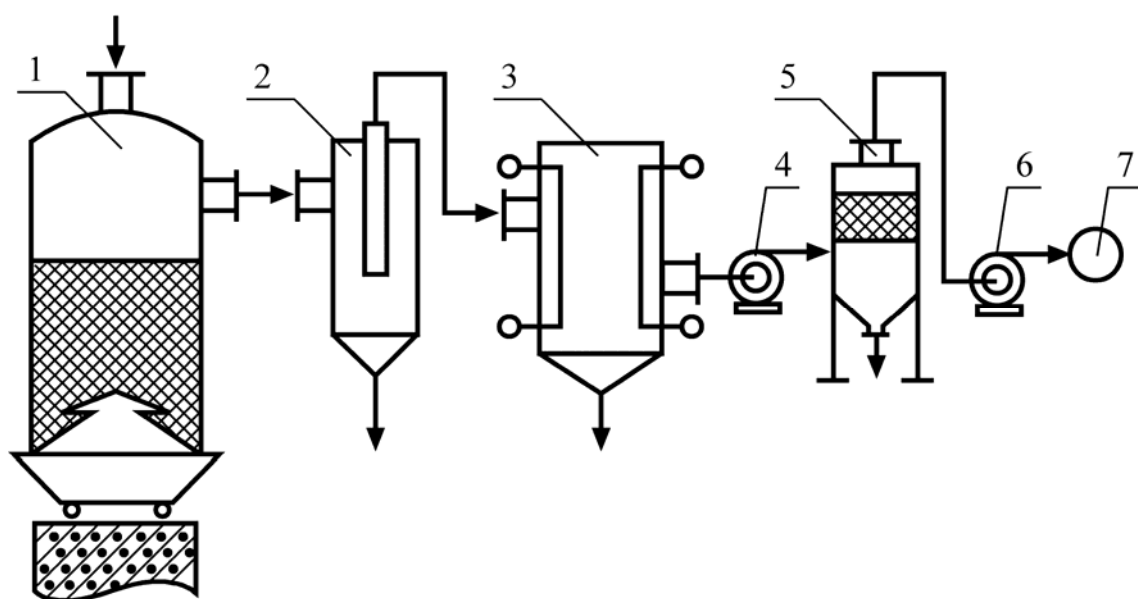


Рис. 3.5. Схема газогенераторной станции:
1 – газогенератор; 2 – батарейный циклон; 3 – охладитель газов; 4 – эксгаустер; 5 – скруббер; 6 – газодувка; 7 – газопровод

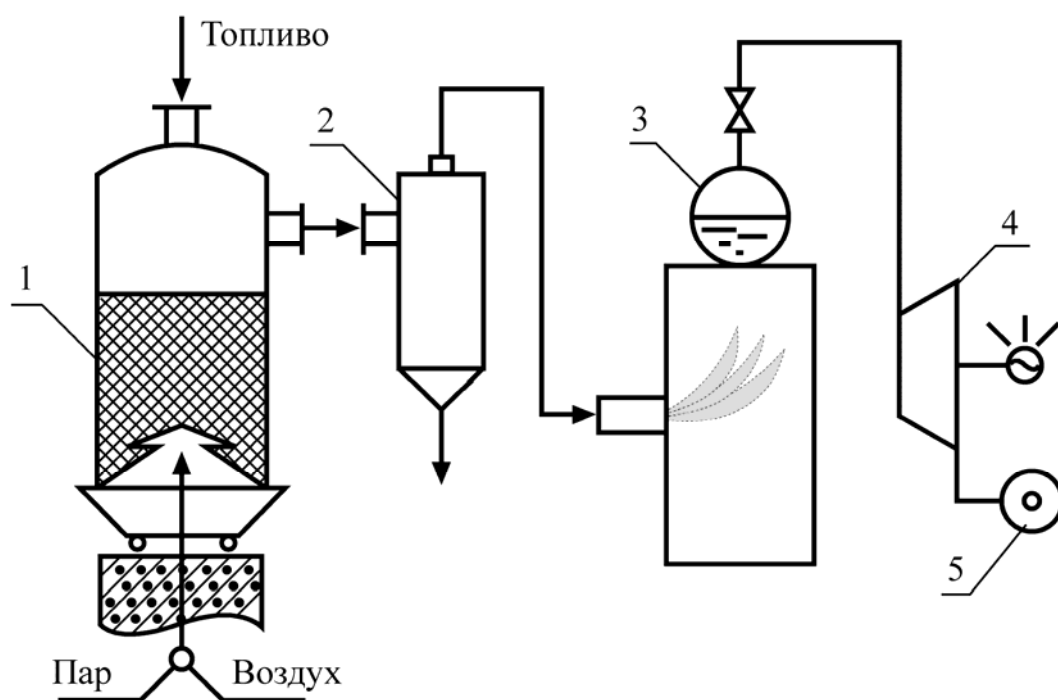


Рис. 3.6. Прямое включение газогенератора в тепловую схему ТЭЦ:
1 – газогенератор; 2 – циклон; 3 – паровой котёл; 4 – паровая турбина; 5 – потребитель теплоты

Тогда КПД оказывается равным

$$\eta_{\text{пг}} = \frac{N^{\text{п}} + N^{\text{г}}}{B_{\text{т}} \cdot Q_{\text{р}}} \cdot 100 \% , \quad (3.8)$$

где $N^{\text{п}}$ – мощность, вырабатываемая на паровом цикле, кВт; $N^{\text{г}}$ – мощность, вырабатываемая на газовом цикле, кВт; $B_{\text{т}}$ – расход топлива, кВт.

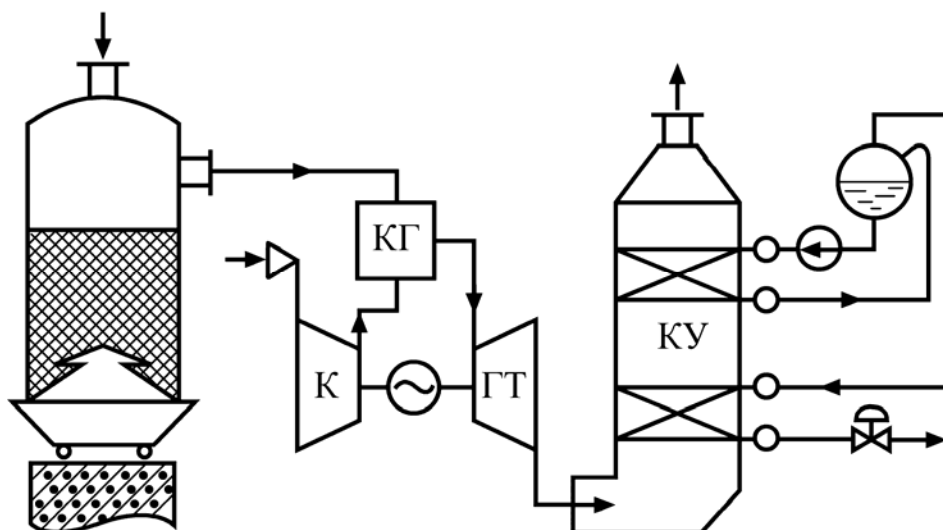
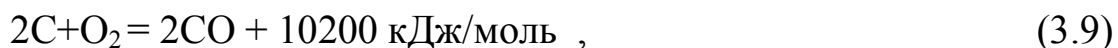


Рис. 3.7. Схема включения газогенератора в газотурбинную установку:
КГ – камера горения; К – компрессор; ГТ – газовая турбина;
ПТ – паровая турбина; КУ – паровой котёл-утилизатор

Характеристика искусственного газа, получаемого в газогенераторах

Паровоздушный газ получается, если в газогенератор вводить паровоздушное дутьё. Количество водяного пара, подаваемого в газогенератор, определяется из уравнения теплового баланса. Если $Q_{\text{энд}} > Q_{\text{экз}}$, то произойдёт потухание газогенератора, а если $Q_{\text{энд}} < Q_{\text{экз}}$, то произойдёт ухудшение качественных показателей генераторного газа.

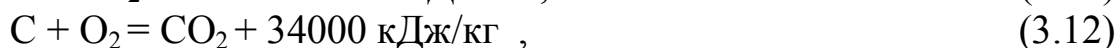
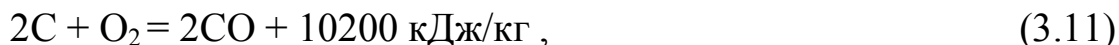


Следует иметь в виду, что дымовые газы из реакционной зоны с высокой температурой (900-1000 °С) используются для газификации топлива, его подсушки и сухой перегонки.

Идеальный паровоздушный газ имеет следующий состав: окись углерода $\text{CO} - 40 \%$; водород $\text{H}_2 - 17,1 \%$; азот $\text{N}_2 - 42,9 \%$.

Воздушный газ получается, если в газогенератор подавать сухой воздух. В этом случае получается низкокалорийный газ, который применяется для химической переработки.

В кислородной зоне протекают следующие реакции

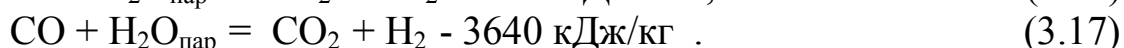
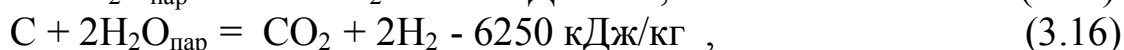


В восстановительной зоне CO_2 разлагается с образованием CO



Идеальный воздушный газ имеет следующий состав: $CO = 34,7 \%$, $N_2 = 65,3 \%$.

Водяной газ получается, если в газогенератор вводят водяной пар. Под воздействием высокой температуры раскалённых коксовых частиц получается водяной газ в соответствии со следующими химическими реакциями разложения водяного пара



Необходимо иметь в виду, что при подаче водяного пара происходит потухание газогенератора, поэтому чередуют дутьё воздушное и водяным паром. Для бесперебойного снабжения водяным газом потребителей необходимо несколько параллельно работающих газогенераторов.

Состав идеального водяного газа, %: $CO_2 = 6,5$; $H_2O = 0,3$; $CO = 37$; $H_2 = 50$; $CH_4 = 0,5$; $N_2 = 5,5$; $O_2 = 0,2$.

3.2. Материальный баланс газогенератора

Целью расчётов газогенераторного процесса является определение состава и теплоты сгорания газа, выход генераторного газа и побочных продуктов в зависимости от топлива, дутья и других факторов. Расчёт, как правило, выполняется для 100 г газифицируемого топлива.

На рис. 3.8 приведён элементный состав твёрдого топлива, поступающего в газогенератор, далее при движении вниз каждый элемент топлива претерпевает изменение и покидает газогенератор с продуктами газификации, с уносом, со смолой или шлаком. В качестве примера в данном разделе приведены материальные балансы

только для углерода и азота, из которых определяются выход газа и расход воздуха для газификации топлива.

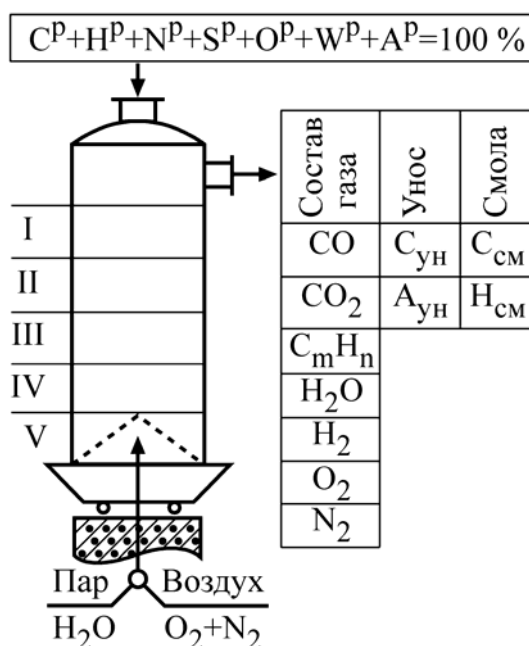


Рис. 3.8. Схема газификации твёрдого топлива:

I – нагревание топлива и его сушка; II – зона выхода летучих горючих веществ; III – зона восстановления (газификации топлива); IV – окислительная зона (зона горения); V – зона охлаждения шлака (нагревание паровоздушной смеси)

Углерод покидает газогенератор или в газообразном состоянии в виде CO, CO₂, C_mH_n, паров смолы, или в твёрдом состоянии в виде уноса с потоком газа C_{ун} и со шлаком C_{шл}. Баланс углерода можно записать следующим равенством

$$C^r = C_{шл} + C_{см} + C_{ун} + (C_{CO_2} + C_{CO} + C_{C_m H_n}), \text{ кг}, \quad (3.18)$$

где C^r – содержание углерода по рабочей массе в 1кг топлива, кг; $C_{шл}$ – содержание углерода в шлаке, кг; $C_{см}$ – содержание углерода в смоле, кг; $C_{ун}$ – содержание углерода в уносе, кг; C_{CO_2} , C_{CO} , $C_{C_m H_n}$ – содержание углерода, соответственно, в углекислом газе, окиси углерода и углеводородных соединениях, кг.

На основании материального баланса углерода определяется расход сухих газов, получаемых в газогенераторе

$$\frac{22,4[C^r - (C_{\text{шл}} + C_{\text{см}} + C_{\text{yh}})]}{12} = V_{\text{сг}} \left(\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum_1^n C_m \text{H}_n \right) \quad (3.19)$$

или

$$V_{\text{сг}} = \frac{22,4 [C^r - (C_{\text{шл}} + C_{\text{см}} + C_{\text{yh}})]}{12 \left(\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum_1^n C_m \text{H}_n \right)}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (3.20)$$

где 12 – молекулярная масса углерода, кг; 22,4 – число Авогадро.

Расход воздуха на газификацию определяется из уравнения материального баланса азота, который имеет следующий вид

$$\frac{N^r}{c} + 0,79V_{\text{в}} = V_{\text{N}_2} \quad \text{или} \quad V_{\text{в}} = \frac{V_{\text{N}_2} - 0,8 N^r}{0,79}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где ρ – плотность азота, кг/м³.

Тепловой баланс газогенератора

Тепловой баланс газогенератора составляется для определения расхода твёрдого топлива и производительности (по генераторному газу), а также для определения эффективности использования топлива.

Приходные статьи

Химическая теплота топлива, выделяющаяся в результате его горения

$$Q_{\text{хт}} = B_{\text{т}} (Q_{\text{с}}^r + Q_{\text{фг}} + Q_{\text{фв}}) = B_{\text{т}} (Q_{\text{с}}^r + c_{\text{т}} t_{\text{т}} + \alpha V_{\text{в}}^0 c_{\text{в}} t_{\text{в}}), \text{ кДж/кг}, \quad (3.21)$$

где $c_{\text{т}}$, $c_{\text{в}}$ – теплоёмкость топлива и воздуха, кДж/(кг·°C); $t_{\text{т}}$, $t_{\text{в}}$ – температура топлива и воздуха, поступающего в газогенератор, °C; α – коэффициент избытка воздуха, $\alpha = 0,3-0,5$; $V_{\text{в}}^0$ – теоретически необходимое количество воздуха для горения топлива, м³/кг.

При расчётах теплового баланса газогенератора применяется высшая теплота сгорания топлива $Q_{\text{с}}^r$, так как теплота, затраченная на испарение влаги, содержащейся в топливе, возвращается в виде теплоты водяных паров в схему газогенераторной станции.

Физическая теплота дутьевой смеси, подаваемой в газогенератор

$$Q_{фд} = B_T \rho_d V_d c_d t_d, \text{ кДж/кг}, \quad (3.22)$$

где ρ_d – плотность дутьевой смеси: воздуха, паровоздушной смеси, пара, кг/м^3 ; V_d – объёмный расход дутья на один килограмм газифицированного топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$; c_d – теплоёмкость дутья, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; t_d – температура дутьевой смеси, $^\circ\text{C}$.

Расходные статьи

Химическая теплота сухого газа

$$Q_{хг} = B_T [q_{\text{CO}} V_{\text{CO}} + q_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2} + q_{\text{CH}_4} V_{\text{CH}_4}] , \text{ кДж/ч}, \quad (3.23)$$

где B_T – расход газифицируемого топлива, кг/ч ; $V_{\text{CO}}, V_{\text{H}_2}, V_{\text{CH}_4}$ – соответственно объём CO , H_2 , CH_4 в составе продуктов газификации, $\text{м}^3/\text{кг}$; q_{CO} – тепловой эффект при сжигании CO , $q_{\text{CO}} = 127,5 \text{ кДж/м}^3$; q_{H_2} – тепловой эффект при сжигании водорода, $q_{\text{H}_2} = 128 \text{ кДж/м}^3$; q_{CH_4} – тепловой эффект при сжигании метана, $q_{\text{CH}_4} = 640 \text{ кДж/м}^3$.

Теплота уносимой пыли:

- химическая теплота пыли

$$Q_{хп} = 34000 B_T g_{\text{ун}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.24)$$

где 34000 – низшая теплота сгорания углерода, содержащегося в пыли, кДж/кг ; $g_{\text{ун}}$ – коэффициент, учитывающий долю уносимого потоком газа и содержание углерода в пыли;

- физическая теплота пыли

$$Q_{фп} = B_T g_{\text{ун}} c_p t_p, \text{ кДж/ч}, \quad (3.25)$$

где c_p – теплоёмкость пыли, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; t_p – температура пыли в газовом потоке, $^\circ\text{C}$.

Теплота шлака, удаляемого из газогенератора:

- химическая теплота шлака

$$Q_{хш} = 34000 B_T g_{\text{шл}} A^r, \text{ кДж/ч}, \quad (3.26)$$

где A^r – зольность топлива; $g_{\text{шл}}$ – доля углерода в шлаке;

- физическая теплота шлака

$$Q_{фш} = B_T A^r c_{\text{шл}} t_{\text{ш}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.27)$$

где $c_{\text{шл}}$ – теплоёмкость шлака, $c_{\text{шл}} = 1,1-1,2$ кДж/(кг·°C); $t_{\text{ш}}$ – температура удаляемого из газогенератора шлака, °C.

Физическая теплота смолы

$$Q_{\text{ф.см}} = G_{\text{см}} c_{\text{см}} t_{\text{см}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.28)$$

где $G_{\text{см}}$ – часовой расход смолы, кг/ч; $c_{\text{см}}$ – теплоёмкость смолы, кДж/(кг·°C).

Теплота, передаваемая корпусом газогенератора паровой рубашке

$$Q_{\text{пр}} = \frac{H_{\text{р}}}{B_{\text{т}}} q_{\text{р}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.29)$$

где $H_{\text{р}}$ – поверхность паровой рубашки, м²; $q_{\text{р}}$ – тепловое напряжение паровой рубашки, $q_{\text{р}} = (100-160)$ кДж/(м²·ч).

Потери теплоты в окружающую среду можно принимать 2-3 % от химической теплоты топлива, выделяемой в газогенераторе

$$Q_{\text{ос}} = (0,02-0,03) B_{\text{т}} Q_{\text{хт}}^{\text{г}}, \text{ кДж/ч}. \quad (3.30)$$

Физическая теплота газа на выходе из газогенератора
- сухого газа

$$Q_{\text{сг}} = B_{\text{т}} V_{\text{сг}} c_{\text{сг}} t_{\text{сг}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.31)$$

где $V_{\text{сг}}$ – объём сухого газа, образующегося в газогенераторе, м³/кг; $c_{\text{сг}}$ – объёмная теплоёмкость сухого газа, кДж/(м³·°C); $t_{\text{сг}}$ – температура газа на выходе из газогенератора, $t_{\text{сг}} = 400-600$ °C;

- пара, содержащегося в газе

$$Q_{\text{п}} = \rho_{\text{сг}} V_{\text{сг}} x i_{\text{п}} B_{\text{т}}, \text{ кДж/ч}, \quad (3.32)$$

где $\rho_{\text{сг}}$ – плотность сухих газов, кг/м³; x – степень сухости; $i_{\text{п}}$ – энтальпия пара, кДж/кг.

Как правило, поверочный расчёт газогенератора заканчивается определением расхода топлива, поэтому необходимо рассчитанные приходные и расходные статьи приравнять и определить расход топлива и КПД газификации.

Химический КПД газификации твёрдого топлива

$$\eta_x = \frac{V_{\Gamma} \cdot Q^d}{Q_s^r} \cdot 100 \% . \quad (3.33)$$

Физический КПД газификации

$$\eta_{\Phi} = \frac{V_{\Gamma} Q^d + Q_{\Phi\Gamma} + Q_{\text{см}}}{Q_s^r + Q_{\Phi\Delta}} \cdot 100\% , \quad (3.34)$$

где Q^d – низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м³;

Q_s^r – высшая теплота сгорания твёрдого топлива, кДж/кг.

Физический КПД газификации твёрдого топлива

$$\eta_{\Phi} = \frac{V_{\Gamma} \cdot Q^d + Q_{\Phi\Gamma} + Q_{\text{см}}}{Q_s^r + Q_{\Phi\Delta}} \cdot 100\% . \quad (3.35)$$

В заключение данного раздела необходимо отметить, что в будущем газификация низкосортного твёрдого топлива найдёт широкое применение в связи с истощением ископаемого углеводородного топлива.

4. Энергосбережение за счет сжигания черных сульфатных щелоков

4.1. Схема производства сульфатной целлюлозы

На рис. 4.1 представлена принципиальная технологическая схема производства сульфатной целлюлозы. Задачей варки является выделение из древесины целлюлозы путем растворения лигнина и других сопутствующих веществ под действием белого щелока. Варка целлюлозы, ее сушка, выпарка черных сульфатных щелоков являются весьма энергоемким процессом, поэтому должны разрабатываться мероприятия по энергосбережению за счет использования теплоты сдувок парогазовой смеси, выдувок нагретой целлюлозы, нагретой воды из барометрического конденсатора и, главным образом, за счет совершенствования технологии производства целлюлозы.

При щелочной варке различают *патронную варку*, когда в качестве варочного раствора применяют белый щелок (NaOH) и карбонат натрия (Na_2CO_3), и *сульфатный способ*, когда варочный раствор состоит из NaOH , Na_2S (сульфида натрия), Na_2CO_3 (карбоната натрия) и Na_2SO_4 (сульфата натрия). Процесс варки целлюлозы состоит из нескольких этапов:

- загрузка котла щепой и заливка щелока;
- нагрев содержимого котла до температуры 165-175 °С за счет циркуляции нагретого щелока в поверхностных теплообменных аппаратах;
- стоянка при температуре 165-175 °С (собственно варка);
- конечная сдвка для снижения давления в котле;
- опорожнение котла методом выдувки.

Во время варки производят сдувки парогазовой смеси, с которой уносится значительное количество теплоты. Терпентинную сдвку проводят в период заварки, начиная от температуры 120-125 °С.

Для обеспечения в варочном котле соответствия температуры и давления насыщенного пара из котла удаляют воздух, скипидар и другие газы. После варки производят разделение полученной варочной массы с помощью фильтров на два потока – целлюлозный поток и поток черного щелока.

Целлюлозная масса после сортирования и размола направляется в отбельный цех и далее на сушильную машину. Если же целлюлоза не отбеливается, то сразу направляется на сушильную машину. Целлюлоза представляет собой полисахарид, образованный остатками глюкозы. Полисахарид является главной составной частью клеточных

стенок растений, обеспечивающий механическую прочность и эластичность растительных волокон. Целлюлоза является полуфабрикатом для химической переработки, а также входит в состав бумаги и картона.

Черный сульфатный щелок после варочного котла и фильтров подается в выпарные аппараты, где происходит его уплотнение от концентрации 18-20 % до концентрации 60-75 %. В выпарной станции происходит также съем сульфатного мыла-сырца для уменьшения вспенивания в выпарных аппаратах.

Далее в черный сульфатный щелок вводится сульфат натрия (Na_2SO_4) для восполнения потерь химикатов в схеме производства и направляется в топку содорегенерационного котельного агрегата (СРК) для сжигания органической части щелока и образования соды (Na_2CO_3) и сульфида натрия (Na_2S).

Образовавшийся расплав минеральной части в расплавленном виде стекает по леткам в бак зеленого щелока и перекачивается в цех каустизации, в котором происходит гашение водой необожженной извести CaO с образованием гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Гашеную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$ соединяют с карбонатом натрия Na_2CO_3 и получают белый щелок NaOH , который перекачивается в варочный котел.

В составе минеральной части черного щелока в основном содержится связанная щелочь $\text{NaOH}_{\text{св}}$, которая при высокой температуре под воздействием углекислого газа CO_2 превращается в карбонат натрия Na_2CO_3



Могут протекать также и другие реакции, например, $\text{NaOH}_{\text{св}}$ с углеродом



или с оксидом углерода



В технологическом процессе производства целлюлозы происходит значительная потеря серы, снижающая сульфидность регенерируемого щелока и способствующая ускорению процессов варки, вследствие чего в процессе сжигания (регенерации) щелока в топку добавляют 8-10 % сульфата натрия по сухой массе.

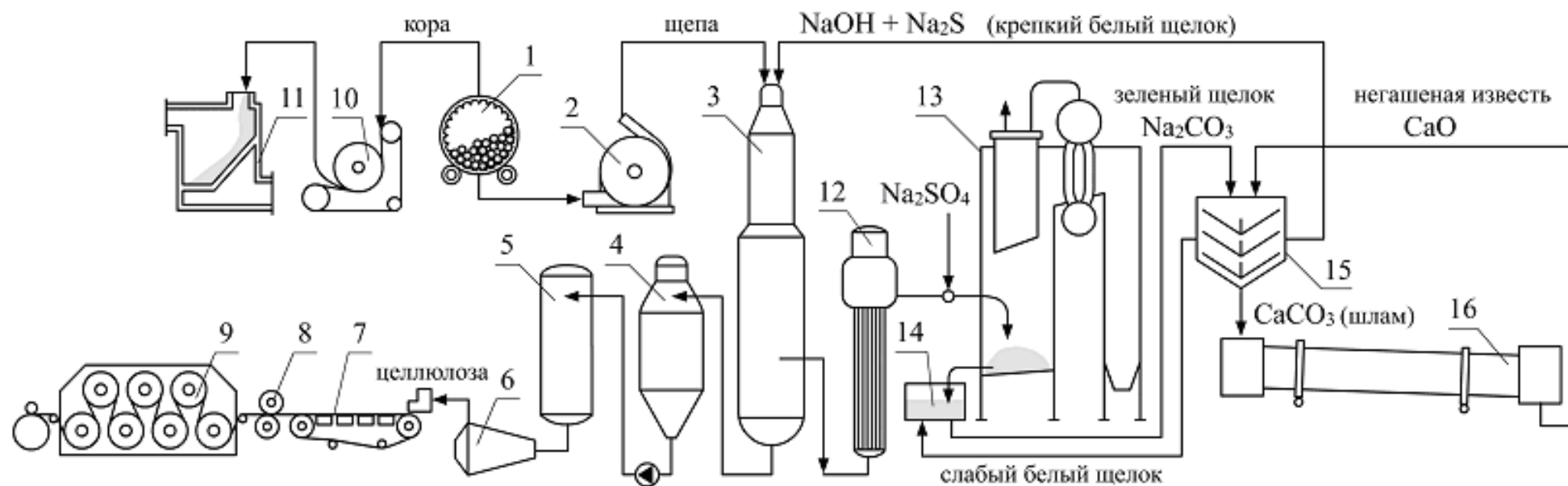
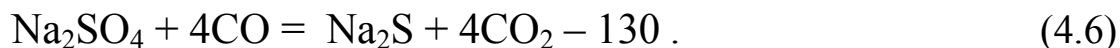
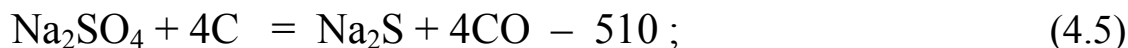
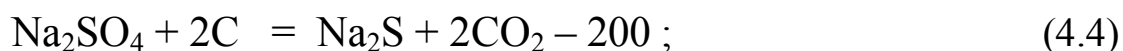


Рис.4.1. Принципиальная схема сульфатцеллюлозного производства:

- 1 – корообдирочный барабан; 2 – рубительная машина; 3 – варочный котел; 4 – выдувной резервуар;
 5 – отбелка целлюлозы; 6 – сортировка; 7 – формование; 8 – прессование; 9 – сушка на сушильной
 машине; 10 – цепной пресс; 11 – топка для сжигания корьевых отходов; 12 – выпарная станция;
 13 - содорегенерационный котел; 14 – бак-растворитель плава; 15 – цех каустизации;
 16 – известерегенерационная печь

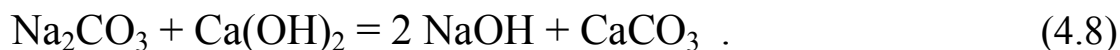
При этом, в зависимости от состава среды непосредственно в топке с сульфатом натрия могут протекать следующие реакции с образованием сульфида натрия (Na_2S), кДж/(г·моль):



В свою очередь, сульфид натрия Na_2S под воздействием углекислого газа CO_2 в присутствии водяных паров H_2O приводит к получению карбоната натрия Na_2CO_3 и сероводорода H_2S



Полученный плав в виде Na_2CO_3 и Na_2S из топочного объема стекает в бак зеленого щелока, и далее подвергается каустизации известковым молоком в соответствии с реакцией



Полученный щелок имеет следующий примерный состав, % : $\text{NaOH} - 65-67$; $\text{Na}_2\text{S} - 27-29$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 8-9$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 1,5-2,5$.

Для получения гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ сначала отработавший шлам CaCO_3 и, частично, свежий известняк обжигают в известерегенерационных печах, где под воздействием высокой температуры происходит разложение с образованием негашеной извести CaO и углекислого газа CO_2



Далее негашеную известь гасят водой с получением гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Таким образом, замыкается цикл регенерации химической активности минеральной части черных сульфатных щелоков, сначала в выпарных аппаратах, затем в СРК и в цехе каустизации и регенерации извести.

4.2. Свойства черного сульфатного щелока

Отработавший в варочных котлах черный сульфатный щелок состоит из влаги, минеральных солей и связанных с ними органических веществ. Сухой щелок содержит 30-35 % минеральных веществ и 65-70 % органических. Содержание их в значительной мере зависит от свойств древесины и процесса варки.

С энергетической точки зрения черный сульфатный щелок является низкокалорийным ($Q_1^f = 13000-14000$ кДж/кг), высокорекреационным (содержание летучих горючих веществ $V^{daf} = 65-70$ %), высокозольным ($A^f = 30-35$ %), высоковлажным ($W^f = 40-45$ %) вторичным топливом, сжигание которого в топках СРК позволяет, однако, в значительной мере (до 70 % на технологические процессы) заменять дорогостоящие натуральные виды топлива.

Основным качественным показателем, характеризующим реакционную способность щелока, является содержание в нем смеси гидроксида натрия $NaOH$ и сульфида натрия Na_2S , называемой активной щелочью. Отношение активной щелочи ко всей щелочи называется степенью активности и выражается соотношением

$$C_T = \frac{NaOH + Na_2S}{NaOH + Na_2S + Na_2CO_3 + Na_2SO_4} \quad (4.11)$$

Состав варочного щелока характеризуется следующими соотношениями

- степенью каустизации

$$C_K = \frac{NaOH}{NaOH + Na_2CO_3} \quad ; \quad (4.12)$$

- степенью сульфидности

$$C_C = \frac{Na_2S}{NaO + Na_2S} \quad ; \quad (4.13)$$

- степенью восстановления сульфата натрия

$$C_B = \frac{Na_2S}{Na_2S + Na_2SO_4} \quad (4.14)$$

В представленной структурной схеме (рис.4.2) показан состав влажного сульфатного черного щелока, который состоит из 40-45 % влаги и 55-60 % сухой части. В свою очередь, сухой остаток щелока

включает в себя органическую часть (60-65 %) и минеральную часть (55-60 %).

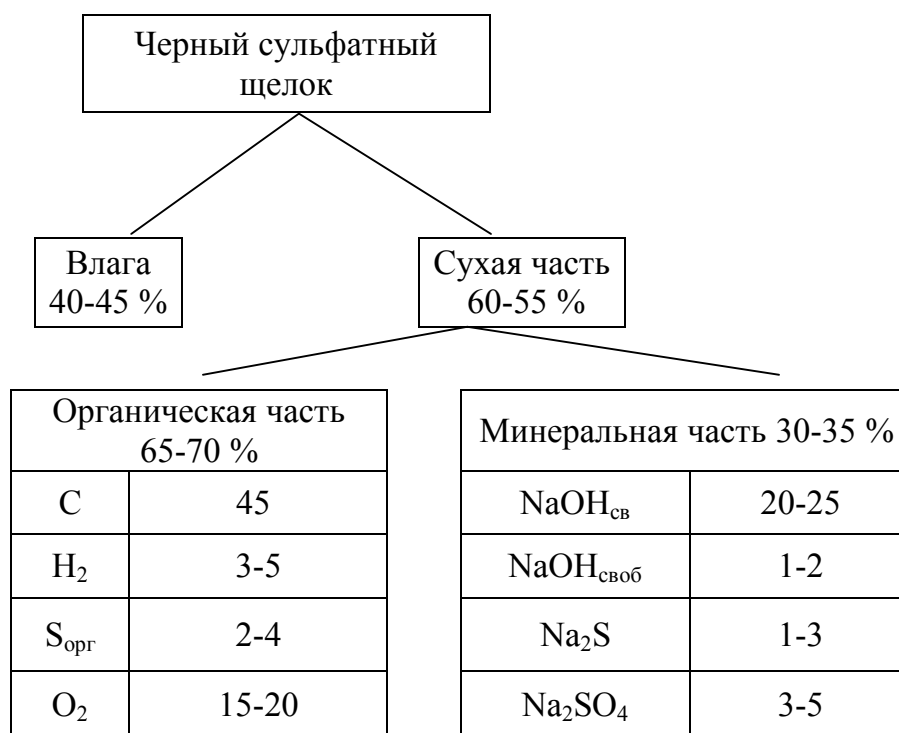


Рис. 4.2. Структурная схема состава черного сульфатного щелока

Органическая часть щелока состоит из лигнина и продуктов разложения углеводов, а элементный состав органической части по рабочей массе включает в себя углерод ($C^r = 40-45 \%$), водород ($H^r = 3-5 \%$), органическую серу ($S_o^r = 2-4 \%$), кислород ($O^r = 15-20 \%$). Минеральная часть щелока включает в себя связанную с органическими соединениями щелочь $NaOH_{связ}$ в количестве 20-25 %, свободную щелочь $NaOH_{своб}$ – 1-2 %, сульфид натрия Na_2S – 1-3 % и сульфат натрия Na_2SO_4 – 3-5 %.

При горении щелока в топке происходит выжиг органических веществ и восстановление реакционной способности химикатов.

С теплотехнической точки зрения, как было указано ранее, черный сульфатный щелок рассматривается как вторичное топливо с калорийностью $Q_I^r = 13000-14000$ кДж/кг (3100-3340 ккал/кг), зольностью 30-35 % и характеризуется как низкосортное, высоковлажное, высокозольное вторичное топливо.

Кроме того, данное топливо требует специфической организации топочного процесса, заключающегося в подготовке и горении частично во взвешенном состоянии, а частично в подушке плава (в куче, располагающейся на поду топки), для протекания химических реакций минеральной части щелока.

4.3. Содорегенерационные котельные агрегаты (СРК)

СРК — это высокотемпературные теплотехнологические установки, в топках которых осуществляются реакции, направленные на восстановление химической активности минеральной части и выжиг органических веществ, содержащихся в щелоке, теплота продуктов сгорания которого используется для получения пара.

Основное назначение СРК — это восстановление химической активности минеральной части щелока, а вспомогательное — получение пара для использования его в технологическом цикле производства целлюлозы.

На рис. 4.3 приведена принципиальная схема содорегенерационного котельного агрегата, которая включает в себя топочное устройство, ширмовый пароперегреватель, развитый испарительный конвективный пучок, экономайзер, электрофильтр и дымосос.

По конструктивным и режимным характеристикам СРК отличаются от энергетических котельных агрегатов, что связано со специфическими свойствами черных сульфатных щелоков, заключающимися в организации химических реакций минеральной части и продуктов сгорания органических веществ, а также мелкодисперсном составе минеральной части. Топка СРК представляет собой параллелепипед, в нижней части которого располагается под со слоем огарка, а на боковых стенах в два или в три яруса установлены сопла, из которых струями вытекает воздух с температурой 130-150 °С и скоростью 30-50 м/с. На боковых стенах топки располагаются форсунки для распыливания щелока.

В соответствии с такой конструкцией топки и расположением воздушных сопел и форсунок процессы горения протекают как в факеле при свободном падении щелоковых частиц, так и в слое огарка, располагающегося на поду топки. Щелок с влажностью 40-45 % подается в топку при помощи механических форсунок грубого распыла, расположенных на высоте 5-6 метров от пода топки. Образующиеся при этом сравнительно крупные капли падают вниз, и по мере испарения влаги с их поверхности образуются капли огарка,

скапливающиеся в виде слоя на поду топки, и выгорают за счет первичного дутья.

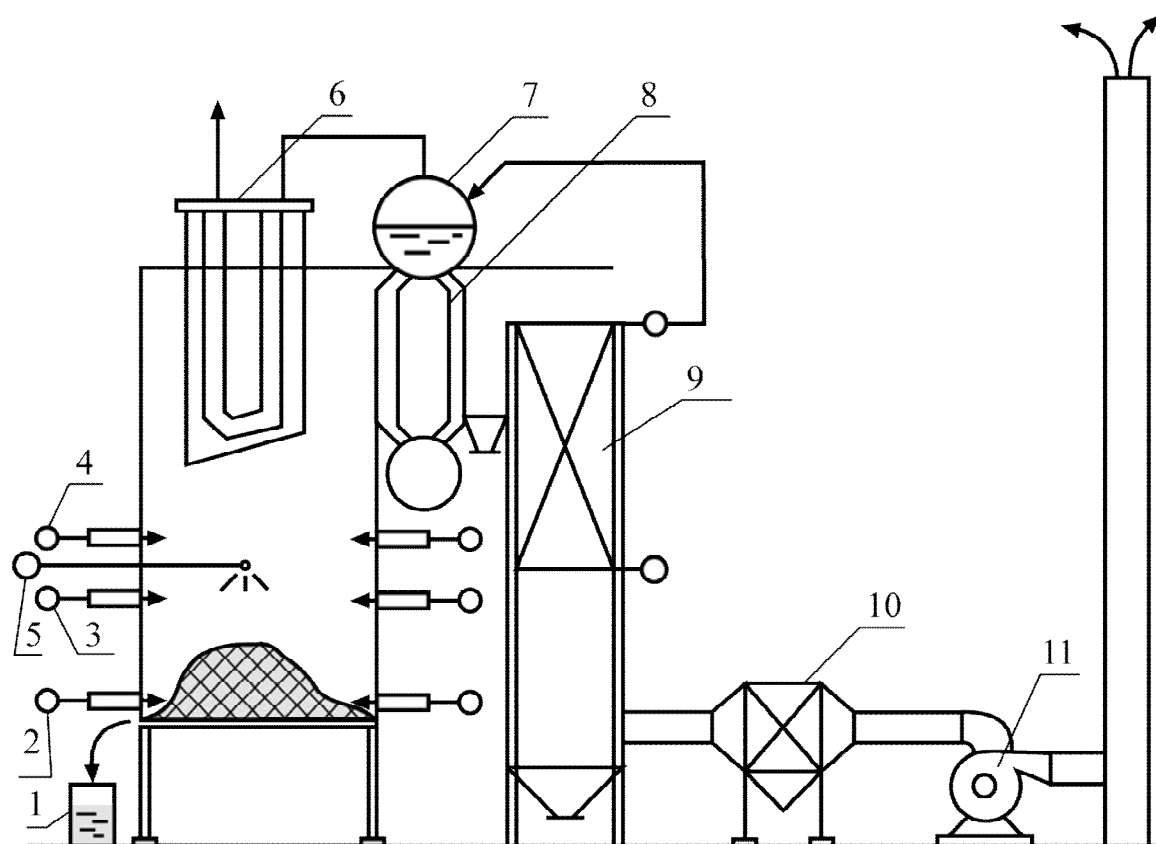


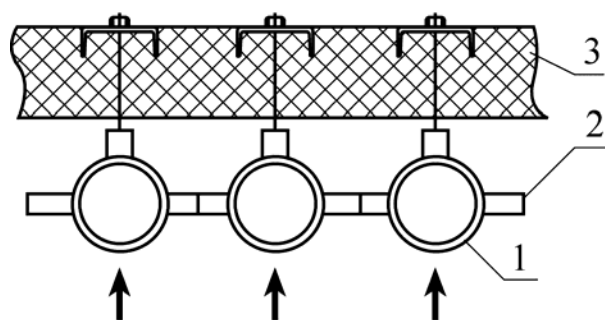
Рис. 4.3. Схема содорегенерационного котельного агрегата:

1 – бак зеленого щелока; 2 – фурма первичного дутья; 3 – фурма вторичного дутья; 4 – фурма третичного дутья; 5 – щелоковая форсунка; 6 – ширмовый пароперегреватель; 7 – барабан котла ; 8 – конвективный испарительный пучок; 9 – ширмовый экономайзер; 10 – электрофильтр; 11– дымосос

Более мелкие частицы щелока сгорают в топочном объеме, а образующиеся при этом тонкодисперсные минеральные частицы увлекаются газоздушным потоком в верхнюю часть топки и в газоходы котельного агрегата, где частично осаждаются на поверхностях нагрева, в результате чего увеличивается температура уходящих газов и уменьшается КПД котлоагрегата.

Расплавленная минеральная часть в виде карбоната натрия Na_2CO_3 и сульфида натрия Na_2S накапливается в нижней части топки, а затем по леткам струями вытекает в бак зеленого щелока.

Газовая плотность топки достигается за счет приваренных к экранным трубам плавников высотой 22 мм, сваренных между собой (рис. 4.4). Свободное термическое расширение экранных труб в топке СРКА осуществляется за счет того, что к экранным трубам привариваются скобы с прорезями, которые свободно перемещаются вместе с экранными трубами (рис. 4.5).



ТОПКА

Рис. 4.4. Газоплотные экранные трубы в топке СРКА:
1 – экранные трубы; 2 – плавники; 3 – обмуровка топки

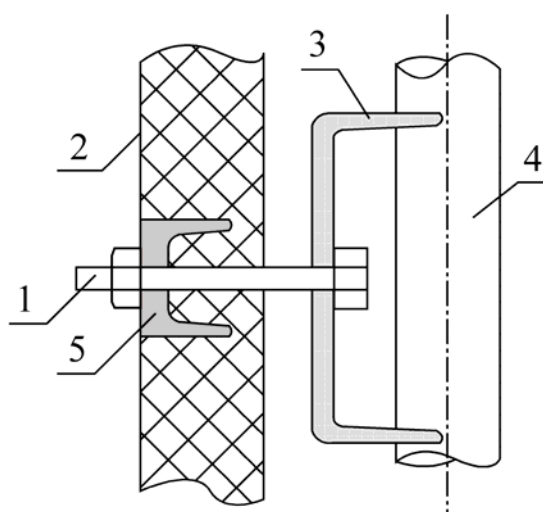


Рис. 4.5. Схема крепления экранной трубы в СРКА:
1 – шпилька; 2 – обмуровка; 3 – скоба; 4 – экранная труба;
5 – швеллер

В верхней части топки располагается ширмовой пароперегреватель, выполненный в виде подвесных трубчатых панелей. За ширмовым может быть установлен конвективный пароперегреватель по конструкции аналогичный энергетическим котельным агрегатам.

Конвективный пучок выполняется из труб диаметром 60 мм с шагом 160 мм. В пучке имеются газовые перегородки, создающие U – образное продольное движение газов в межтрубном пространстве.

Для очистки поверхностей нагрева пароперегревателя и конвективного пучка предусматривается установка обдувочных аппаратов выдвижного типа. Очистка труб водяного экономайзера производится при помощи дробеочистки.

Водяной экономайзер у СРК выполняется в виде трубчатых панелей, расположенных вертикально в конвективной шахте котельного агрегата.

Воздухоподогреватели у СРК выносятся за пределы газоходов, так как они обогрываются котловой водой или паром. В том и в другом случаях есть вероятность попадания воды в топку и возникновения взрыва в топочном пространстве, поэтому необходимо предусматривать устройства, предупреждающие попадание воды в топку.

Современные конструкции содорегенерационных котлоагрегатов основываются на паровых котлах средней мощности, рассчитанных на получение пара давлением не более 4 МПа и температурой 450 °С в целях снижения скорости высокотемпературной коррозии.

В современных схемах СРК отсутствуют газоконтактные каскадные испарители в связи с тем, что они являются источником загрязнения окружающей среды легкоиспаряющимися веществами, содержащимися в щелоке, такими как метилмеркаптан CH_3SH , сероводород H_2S , диметилсульфид $(\text{CH}_3)_2\text{S}$. Снижение влажности щелока обеспечивается дополнительно устанавливаемыми выпарными аппаратами (концентраторами), при установке которых концентрацию сухих веществ можно повысить до 73-75 %.

Установка концентраторов в схеме СРК вместо каскадных испарителей в значительной мере изменяет процессы, протекающие в топочном объеме, а именно:

- увеличивается скорость горения черного щелока;
- снижается расход продуктов сгорания за счет уменьшения объема водяных паров и, соответственно, уменьшается скорость газов в сечении топки;
- уменьшается унос минеральных солей и их отложение на конвективных поверхностях нагрева.

Для очистки дымовых газов в схеме СРК предусматривается установка электрофильтров, основанных на создании электрического поля между катодами и анодами. Когда запыленный поток дымовых газов проходит между электродами, частицы пыли заряжаются и

прилипают к катоду, пластины которого периодически отряхиваются и унос возвращается в технологическую схему.

Однако применение электрофильтров для очистки дымовых газов сопряжено со значительными затратами энергии в виде постоянного тока для создания электрического поля.

Для снижения влажности щелока, поступающего в топку СРК, применяется также газоконтактный способ с помощью скруббера Вентури, состоящего из трубы Вентури и циклона (рис. 4.6). Щелок, подаваемый в узкое сечение трубы через специальные сопла, увлекается перпендикулярно направленным потокам дымовых газов и далее газожидкостная смесь поступает в циклон, где происходит разделение потоков – на щелочовой и газовый. Кроме упаривания щелоков в скрубберах Вентури происходит очистка дымовых газов.

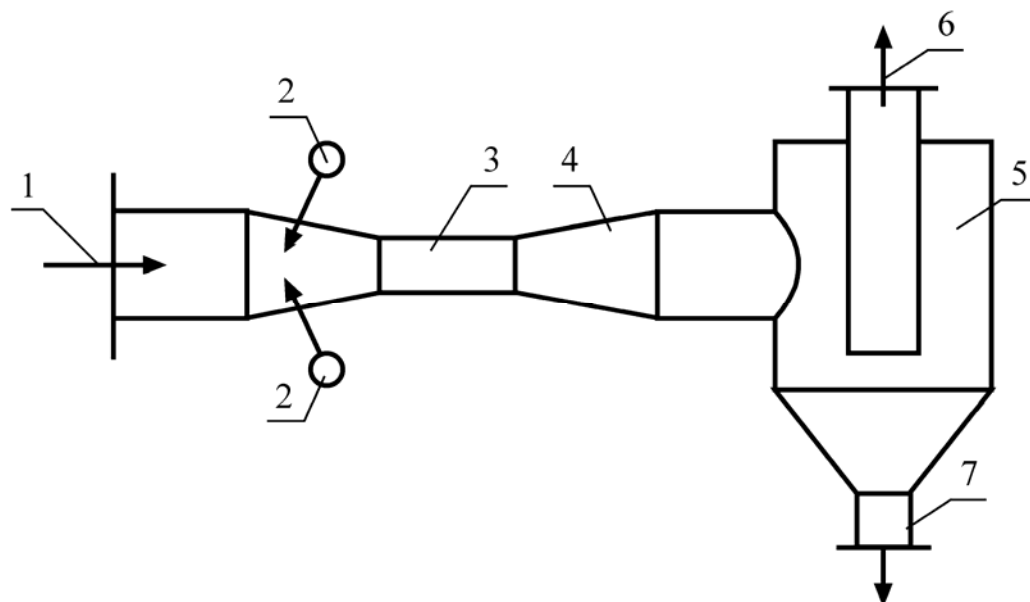


Рис. 4.6. Труба Вентури для улавливания уноса:

- 1 – поток запыленных дымовых газов; 2 – щелочовые форсунки;
3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – циклон; 6 – отвод
очищенных продуктов сгорания; 7 – отвод уноса

Однако, при всей привлекательности скруббера Вентури для дополнительного упаривания щелока и улавливания твердых частиц химикатов необходимо отметить, что в таких схемах затрачивается большое количество энергии на преодоление сопротивления трубы и, соответственно, циклона. Кроме того, при контакте капель щелока с газовым потоком легкоиспаряющиеся вещества, входящие в состав щелока, загрязняют окружающую среду вредными выбросами.

Обдувочные аппараты предназначены для поддержания в чистоте поверхностей нагрева СРК (рис. 4.7). Отложения, осаждающиеся на трубах, представляют собой минеральную часть щелока.

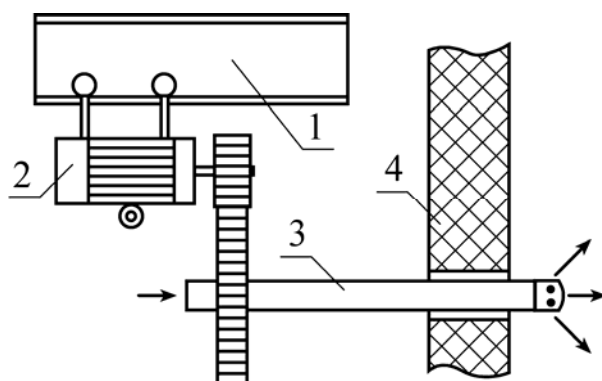


Рис. 4.7. Обдувочный аппарат для СРКА:

- 1 – двутавровая балка; 2 – приводной электродвигатель;
3 – обдувочная труба; 4 – футеровка котла

Обдувочный аппарат состоит из электродвигателя, используемого для вращения и перемещения обдувочной трубы с соплами, монорельса и других узлов. Обдувочный аппарат автоматизирован и включается в работу в соответствии с программой обдувки различных поверхностей.

На СРК для горизонтально расположенных змеевиков экономайзеров применяется очистка чугуновой или алюминиевой дробью.

При эксплуатации СРК есть вероятность возникновения топочных взрывов, которые могут разрушить обмуровку, каркас и другие устройства.

Физическая природа взрывов обусловлена тем, что на раскаленную кучу плава попадает вода при разрыве экранной трубы, в результате мгновенного испарения воды удельный объем пара увеличивается в 1700 раз, что приводит к увеличению давления в топке.

Химическая природа топочных взрывов в СРК связана с тем, что при высокой температуре происходит диссоциация водяных паров с образованием водорода. Два объема водорода и один объем кислорода образуют гремучую смесь, которая взрывается без постороннего источника энергии. Образование водорода в присутствии углерода протекает в соответствии со следующей реакцией



Физико-химическая природа взрывов связана с одновременным протеканием физических процессов повышения давления в топке и химических процессов образования водорода.

Эксплуатационная причина возникновения топочных взрывов связана с нарушением режима горения щелока в результате применения для подсветки более реакционного топлива – мазута. В большинстве случаев мазутные форсунки, предназначенные для стабилизации горения влажного щелока, устанавливают в воздушную фурму и добавляют мазут при постоянном расходе воздуха, в результате чего образуется химический недожог, который может привести к взрыву.

4.4. Тепловой баланс содорегенерационного котельного агрегата

Тепловой баланс СРК составляется, рассчитывается и анализируется таким же образом, как и для энергетических котельных агрегатов. Уравнение теплового баланса СРК, выраженное в тепловых потоках, имеет вид

$$B_T Q_i^r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8, \text{ кДж/кг}, \quad (4.16)$$

где B_T – расход щелока, кг/ч.

Уравнение теплового баланса СРК, выраженное в процентах, записывается следующим образом

$$\begin{aligned} 100 \% = & \frac{Q_1}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_2}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_3}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_4}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \\ & + \frac{Q_5}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_6}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_7}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% + \frac{Q_8}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% \end{aligned} \quad (4.17)$$

или

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 = 100 \% . \quad (4.18)$$

Рабочая расчетная теплота сгорания щелока равна

$$Q_p = Q_i^r + Q_{фг} + Q_{фв} = Q_i^r + C_T t_T + \alpha V_B^0 C_B t_B, \text{ кДж/кг}, \quad (4.19)$$

где $Q_{фг}$ – физическая теплота топлива, кДж/кг; $Q_{фв}$ – физическая теплота дутьевого воздуха, кДж/кг; C_T , C_B – теплоемкость топлива и воздуха кДж/(кг·°C); V_B^0 – теоретический расход воздуха для горения щелока, м³/кг; α – коэффициент избытка воздуха.

Полезно полученная теплота в СРК q_1 , выраженная в процентах, или КПД котельного агрегата в результате сжигания щелока рассчитывается по формуле

$$q_1 = \frac{Q_1}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \frac{D_{пе} (i'' - i_{пв}) + D_{пр} (i_{кв} - i_{пв})}{B_T Q_i^r} \cdot 100, \% , \quad (4.20)$$

где $D_{пе}$ – расход перегретого пара, кг/ч; i'' – энтальпия перегретого пара, кДж/кг; $i_{пв}$, $i_{кв}$ – энтальпия питательной и котловой воды, кДж/кг; $D_{пр}$ – расход продувочной воды, кг/ч (принимается по «Нормам теплового расчета котельных агрегатов»).

Потери теплоты с уходящими газами

$$q_2 = \frac{Q_2}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \frac{V_{yx} \bar{C}_{yx} t_{yx} - V_B C_B t_B}{B_T} \cdot 100, \% , \quad (4.21)$$

где V_{yx} – объемный расход уходящих газов из котельного агрегата, м³/ч; $\bar{C}_{yx}$ – средняя объемная теплоемкость уходящих из котельной установки газов, кДж/(м³·°C); t_{yx} – температура уходящих газов, °C; C_B – объемная теплоемкость наружного воздуха, кДж/(м³·°C); t_B – температура наружного воздуха, °C.

Потери теплоты от химической неполноты сгорания черного сульфатного щелока

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{Q_3}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \\ &= \frac{V_{yx} (126,5 \text{ CO} + 108 \text{ H}_2 + 358 \text{ CH}_4)}{B_T Q_i^r} \cdot 100, \% , \end{aligned} \quad (4.22)$$

где 126,5; 108; 358 – тепловые эффекты горения соответственно CO, H₂ и CH₄; CO, H₂, CH₄ – содержание в продуктах сгорания соответственно оксидов углерода, водорода и метана.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания черных сульфатных щелоков

$$q_4 = \frac{Q_4}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \left(a_{yH} \frac{\Gamma_{yH}}{100 - \Gamma_{yH}} + a_{пл} \frac{\Gamma_{пл}}{100 - \Gamma_{пл}} \right) \frac{32682 A^r B_T}{B_T Q_i^r} \cdot 100, \% , \quad (4.23)$$

где a_{yH} – содержание золы в уносе; Γ_{yH} – содержание горючих в уносе; $a_{пл}$ – содержание плава; $\Gamma_{пл}$ – содержание горючих в плаве.

Потери теплоты в окружающую среду

$$q_5 = \frac{Q_5}{B_T Q_i^r} \cdot 100 = \frac{\sum_i^{\pi} k_i F_i \Delta t_i}{B_T Q_i^r} \cdot 100, \% , \quad (4.24)$$

где k_i – коэффициент теплопередачи на i -м участке, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; F_i – расчетный участок футеровки котельного агрегата, м^2 ; Δt_i – разность температур между продуктами сгорания и окружающей средой, $^\circ\text{C}$.

Потери с физической теплотой плава, вытекающего из топки в бак зеленого щелока

$$q_6 = \frac{Q_6}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \frac{C_{пл} B_{пл} (100 - W^r) t_{пл}}{100 B_T Q_i^r} \cdot 100, \% , \quad (4.25)$$

где $C_{пл}$ – теплоемкость плава, $C_{пл} = 1,13 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{пл}$ – температура плава, $t_{пл} = 850-900 \text{ }^\circ\text{C}$; W^r – относительная влажность щелока, %.

Потери теплоты на плавление солей

$$q_7 = \frac{Q_7}{B_T Q_i^r} \cdot 100\% = \frac{B_T (1 - \frac{W^r}{100}) \cdot \frac{A^r}{100}}{B_T Q_i^r} \cdot (167,6a_1 + 62a_2 + 358,2a_3 + 257,7a_4) \cdot 100, \% , \quad (4.26)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – содержание соответственно NaOH, Na₂S, Na₂CO₃, Na₂SO₄, %.

Удельные расходы теплоты на плавление минеральных солей, кДж/кг :

$$\begin{aligned} q_{\text{пл}} \text{ NaOH} &= 167,6 ; \\ q_{\text{пл}} \text{ Na}_2\text{S} &= 62,0 ; \\ q_{\text{пл}} \text{ Na}_2\text{CO}_3 &= 358,2 ; \\ q_{\text{пл}} \text{ Na}_2\text{SO}_4 &= 257,7 . \end{aligned}$$

Потери теплоты на восстановление сульфата натрия определяются как разность количества сульфида Na, находящегося в плаве и количества сульфида Na, вносимого в топку с черным щелоком, умноженную на тепловой эффект

$$q_8 = \frac{Q_8}{B_T Q_i^r} \cdot 100 \% = \frac{(a_1^{\text{Na}_2\text{S}} - a_2^{\text{Na}_2\text{S}}) \cdot 12964}{B_T Q_i^r} \cdot 100 , \% , \quad (4.27)$$

где a_1, a_2 – количество Na₂S, содержащегося в плаве и вносимого в топку с черным щелоком; 12964 – тепловой эффект, кДж/кг.

При тепловых расчетах СРК различают технологический и энергетический КПД.

Технологический КПД по обратному тепловому балансу равен

$$q_1 = z_{\text{тл}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) \cdot 100 , \% . \quad (4.28)$$

При расчете энергетического КПД считают, что q_6, q_7 и q_8 являются потерями теплоты, тогда

$$z_{\text{эн}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8) , \% . \quad (4.29)$$

На основании выполненного теплового баланса СРК производят анализ полезно использованной теплоты топлива (КПД котельного агрегата и тепловых потерь путем сопоставления с нормируемыми расходами или расходами теплоты и топлива на аналогичном оборудовании) и на этом основании принимают инженерные решения по сокращению тех или иных потерь.

Экономию природного газа в результате применения черного щелока как топлива можно рассчитать по следующей зависимости

$$B_{\Gamma} = B_{\text{щ}} \frac{Q_{\text{ищ}}^r \rho_{\Gamma}}{Q_{\text{иг}}^r} , \text{ м}^3/\text{ч} , \quad (4.30)$$

где $B_{\text{щ}}$ – расход щелока на СРК, кг/ч; $Q_{\text{ищ}}^{\text{r}}$ – низшая теплота сгорания щелока, кДж/кг; $Q_{\text{иг}}^{\text{r}}$ – низшая теплота сгорания природного газа, кДж/м³; $\rho_{\text{г}}$ – плотность природного газа, кг/м³.

В отличие от натуральных видов топлива при горении черных сульфатных щелоков протекают эндотермические реакции с поглощением теплоты, оказывающие защитное влияние на количество выделившейся теплоты. П.А.Жучков низшую теплоту сгорания всех горючих элементов сухого щелока за вычетом углерода, пошедшего на восстановительные реакции $C_{\text{вс}}$, рекомендует рассчитывать по формуле

$$Q_{\text{i}}^{\text{d}} = 33700 C_{\text{св}}^{\text{d}} + 141500 \left(H^{\text{d}} - \frac{O^{\text{d}}}{8} \right) + 11100 S_{\text{o}}^{\text{d}} - 22600 H^{\text{d}}, \quad \text{кДж/кг}, \quad (4.31)$$

где $C_{\text{св}}^{\text{d}}$, H^{d} , S_{o}^{d} , O^{d} – содержание горючих элементов и кислорода в органической массе сухого щелока, кг/кг.

При этом количество свободного углерода, сгорающего за счет кислорода воздуха равно

$$C_{\text{св}}^{\text{d}} = C^{\text{d}} - 0,17 (a_{\text{сщ}} + a_{\text{сд}}), \quad \text{кг/кг}, \quad (4.32)$$

где C^{d} – количество углерода в сухой массе щелока, кг/кг; $a_{\text{сщ}}$, $a_{\text{сд}}$ – относительное количество сульфата, содержащегося в щелоке и добавляемого, кг/кг.

Кроме того, в процессе регенерации щелока часть теплоты затрачивается на плавление минеральных солей. В связи с этим можно ввести понятие эффективной теплоты сгорания сухого сульфатного щелока

$$Q_{\text{эф}}^{\text{d}} = Q_{\text{i}}^{\text{d}} - Q_{\text{вс}} - Q_{\text{пл}}, \quad \text{кДж/кг}. \quad (4.33)$$

Эндотермический эффект восстановления сульфата $Q_{\text{вс}}$, отнесенный к 1 кг углерода, пошедшего на реакцию, равен 8900 кДж/кг.

Теплота нагрева и плавления минеральных солей равна

$$Q_{\text{пл}} = a_{\text{пл}} (C_{\text{пл}} t_{\text{пл}} + \lambda), \quad \text{кДж/кг}, \quad (4.34)$$

где $a_{пл}$ – масса плава, получаемого с 1 кг сухого щелока, кг; λ – теплота плавления солей, $\lambda = 335$ кДж/кг; $C_{пл}$, $t_{пл}$ – средние значения теплоемкости и температуры плава, $C_{пл} = 1,15$ кДж/(кг · °C), $t_{пл} = 850$ °C.

Эффективная теплота сгорания влажного черного щелока, или, что то же самое, низшая рабочая теплота сгорания влажного щелока равна

$$Q_{эф}^{вл} = Q_{эф}^d - 2260 U, \text{ кДж/кг}, \quad (4.35)$$

где 2260 – теплота парообразования водяных паров при атмосферном давлении, кДж/кг; U – влагосодержание влажного щелока, $U = W_{щ} / (100 - W_{щ})$ кг/кг; $W_{щ}$ – относительная влажность щелока, %.

Теоретический расход воздуха на 1 кг сухого щелока (при полном сгорании $\alpha = 1,0$)

$$V_B^o = 8,89 (C_{св}^d + 0,375 S_o^d) + 26,5 H^d - 33,3 O^d, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (4.36)$$

Теоретический объем продуктов сгорания рассчитывается с учетом образования углекислого газа при восстановлении сульфата и карбонизации щелока. Объем сухих трехатомных газов $RO_2 = CO_2 + SO_2$ следует рассчитывать по полному содержанию углерода в сухом щелоке, за вычетом CO_2 , пошедшего на карбонизацию щелока

$$V_{RO_2}^o = 1,866 (C^d + 0,375 S_o^d) - 0,29 a_{щ}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (4.37)$$

Что же касается энергосбережения, то всю теплоту в виде пара и электрической энергии, полученную за счет сжигания щелока, можно отнести к использованию энергосберегающей технологии при производстве сульфатной целлюлозы, так как в равной степени производится замещение натуральных видов топлива вторичными.

По данным балансовых испытаний предприятий ЦБП установлено, что потребность в технологии обеспечивается за счет сжигания щелока на 70-75 %.

5. Энергосбережение при снижении температуры уходящих газов

5.1. Котлы-утилизаторы

Котлы-утилизаторы предназначены для снижения температуры продуктов сгорания, получаемых в различных технологических процессах. Отличительной особенностью котлов-утилизаторов, в сравнении с энергетическими, является отсутствие топки для сжигания топлива и получения продуктов сгорания.

По схемам и конструкции трубных систем котлы-утилизаторы такие же, как и энергетические котельные установки малой и средней производительности.

Установка котлов-утилизаторов на потоке высокотемпературных газов приносит значительный эффект в отношении экономии топливно-энергетических ресурсов.

На рис. 5.1 приведена схема дымогарного котла, который состоит из барабана, внутри которого располагаются трубы диаметром 50-60 мм, сухопарника, подводящих и отводящих газоходов.

Дымовые газы в этих котлах проходят внутри труб, а котловая вода располагается между трубами конвективного испарительного пучка. Образующийся пар поступает в сухопарник, где отделяются капельки влаги от паровой фазы и далее направляются потребителю.

Имеются энергетические водогрейные котлы такой же конструкции, но вместо части дымогарных труб установлена жаровая труба, в которой располагается топка для сжигания газообразного или жидкого топлива.

На рис. 5.2 показан водотрубный котел-утилизатор, в котором котловая вода находится в трубах, а продукты сгорания в межтрубном пространстве. Благодаря газовым перегородкам поток продуктов сгорания меняет свое направление и обтекает трубные пучки как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Циркуляция котловой воды осуществляется за счет разности плотностей воды и пароводяной смеси: по левому ряду труб пароводяная смесь поднимается, а по правым рядам труб котловая вода опускается.

На рис. 5.3 приведена схема котла-утилизатора с принудительной циркуляцией котловой воды в контуре конвективного пучка. Под действием насоса котловая вода забирается из барабана и

направляется в конвективный испарительный пучок, где частично испаряется.

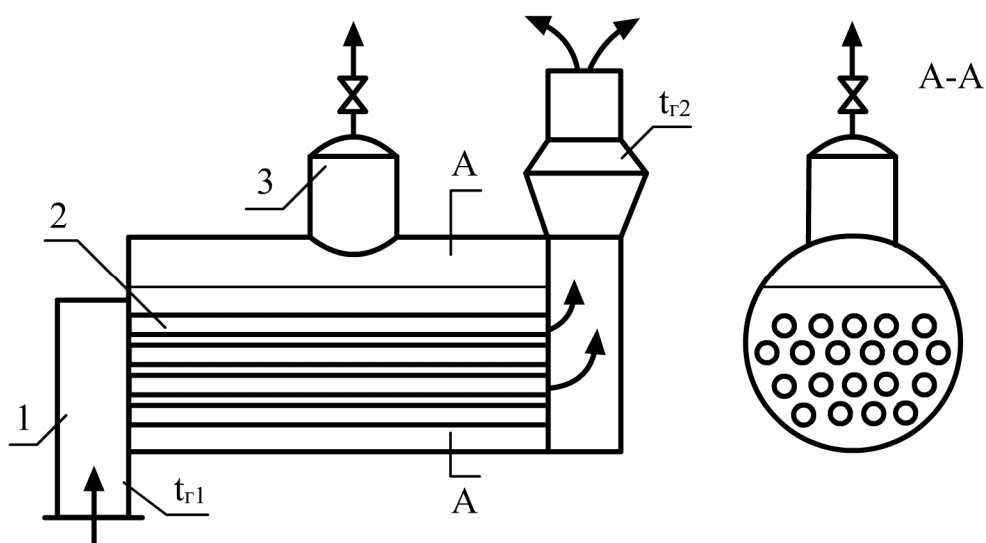


Рис. 5.1. Схема дымогарного котла-утилизатора:
1 – подвод высокотемпературных газов; 2 – дымогарные трубки; 3 – сухопарник

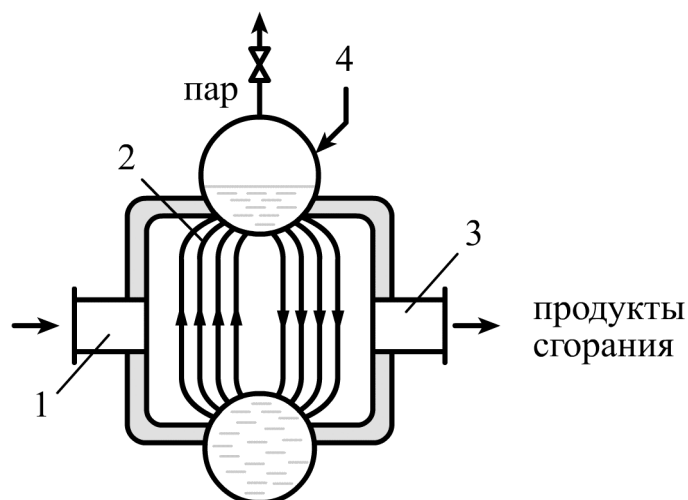


Рис. 5.2. Водотрубный котёл-утилизатор:
1 – высокотемпературные продукты сгорания; 2 – конвективный испарительный пучок; 3 – отвод газов; 4 – питательная вода

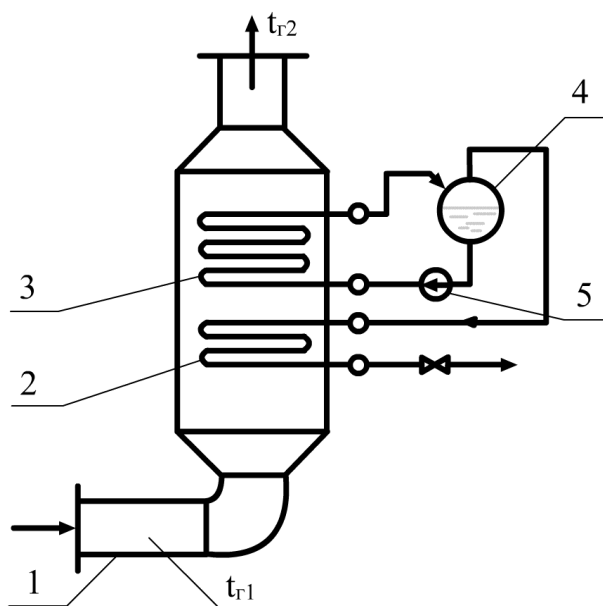


Рис. 5.3. Схема котла-утилизатора с принудительной циркуляцией:
1 – вход высокотемпературных дымовых газов;
2 - пароперегреватель; 3 – конвективный испарительный пучок; 4 – барабан; 5 – циркуляционный насос

Такая схема котла-утилизатора с принудительной циркуляцией очень компактна, имеет небольшие габариты, но наличие циркуляционного насоса снижает надежность работы оборудования.

Уравнение теплового баланса для рассмотренных схем котлов-утилизаторов имеет следующий вид

$$V_{\text{г}} c_{\text{рг}} (t_{\text{г1}} - t_{\text{г2}}) \varphi = D_{\text{п}} (i'' - i_{\text{пв}}), \text{ кДж/ч}, \quad (5.1)$$

где $V_{\text{г}}$ – объемный расход продуктов сгорания через котел-утилизатор, $\text{м}^3/\text{ч}$; $c_{\text{рг}}$ – средняя объемная теплоемкость продуктов горения, поступающих в котел-утилизатор, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{г1}}$, $t_{\text{г2}}$ – температуры продуктов сгорания до и после котла, $^\circ\text{C}$; φ – коэффициент тепловых потерь котла-утилизатора; i'' , $i_{\text{пв}}$ – соответственно энтальпии полученного пара и питательной воды, кДж/кг .

Как правило, из уравнения (5.1) определяют расход вырабатываемого котлом пара за счет утилизации отработавших продуктов сгорания, который равен

$$D_{\text{п}} = \frac{V_{\text{г}} c_{\text{рг}} (t_{\text{г1}} - t_{\text{г2}}) \varphi}{i'' - i_{\text{пв}}}, \text{ кг/ч}. \quad (5.2)$$

Экономию условного топлива можно определить из соотношения

$$B_{\text{уг}} = \frac{D_{\text{п}} (i'' - i_{\text{пв}}) \eta_{\text{ка}}}{29330}, \text{ кг/ч}, \quad (5.3)$$

где 29330 – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{ка}}$ – КПД котельного агрегата.

Как показывает опыт эксплуатации, котлы-утилизаторы являются надежными, простыми, высокоэффективными энергетическими установками для утилизации высокотемпературных продуктов сгорания и экономии топливно-энергетических ресурсов.

В тепловом балансе котельных установок основной потерей является теплота с уходящими газами, которая составляет 6-10 % от подведенной теплоты с топливом. Температура уходящих газов при этом составляет 120-160 °С при сжигании природного газа. Дальнейшее снижение температуры уходящих газов связано с конденсацией водяных паров на поверхностях нагрева воздухоподогревателя и экономайзера, их коррозией и выходом из строя. По этой причине температуру уходящих газов поддерживают выше на 15-20 °С температуры точки росы.

5.2. «Глубокое» охлаждение уходящих газов

На рис. 5.4а показана схема «глубокого» охлаждения продуктов сгорания газообразного топлива до температуры 50-70 °С за счет установки за котлом теплофикационного экономайзера. На этих поверхностях нагрева происходит конденсация водяных паров и, следовательно, идут коррозионные процессы, поэтому рекомендуется применять ребристые чугунные трубы Кусинского завода, или коррозионно-стойкие материалы, которые могут находиться в эксплуатации длительное время. Процессы изменения продуктов сгорания приведены на рис. 5.4б, из которых следует, что экономический эффект в данной схеме достигается за счёт физического охлаждения продуктов сгорания (процесс 1-2) и конденсации водяных паров (процесс 2-3).

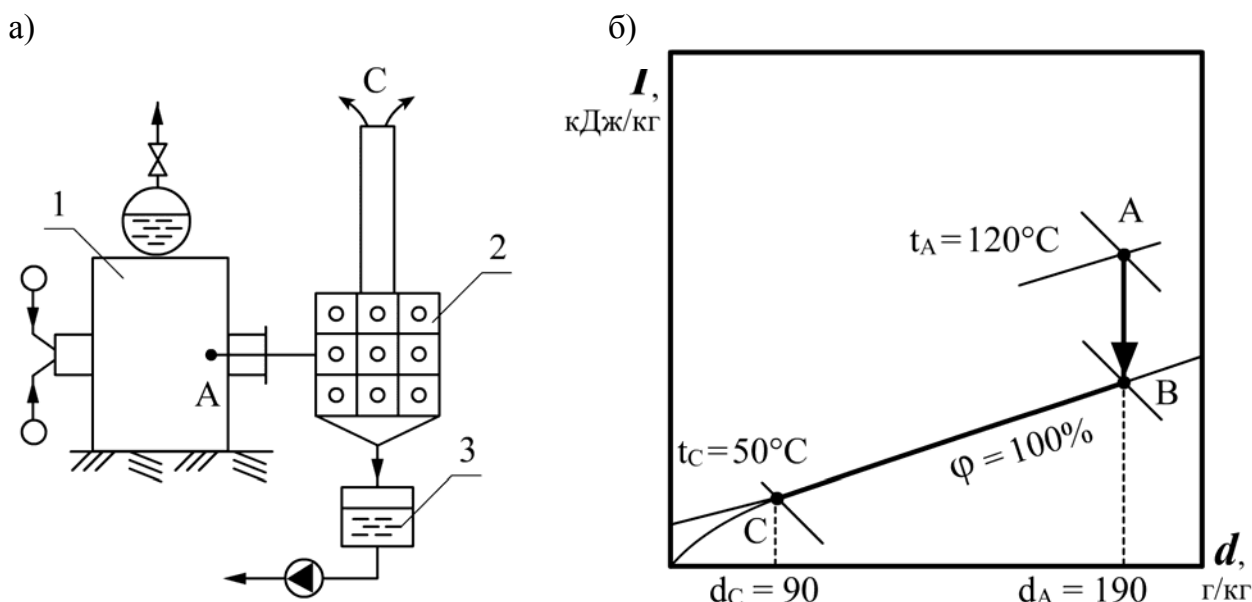


Рис.5.4. Схема «глубокого» охлаждения уходящих газов в схеме котельной установки, работающей на естественной тяге (а) и процессы изменения состояния параметров уходящих газов на I d -диаграмме (б): 1 – котёл; 2 – теплофикационный экономайзер; 3 – сборник конденсата

Количество выделяющейся теплоты за счёт физического охлаждения продуктов сгорания до температуры «точки росы» (т. В)

$$Q_{A-B} = L_{\text{сг}} (I_A - I_B) = L_{\text{сг}} C_{\text{сг}} (t_A - t_B) , \quad \text{кДж/ч} , \quad (5.4)$$

где $L_{\text{сг}}$ – массовый расход сухих продуктов сгорания, кг/ч; I_A , I_B – энтальпии продуктов сгорания соответственно в точках А и В, кДж/кг; t_A , t_B – температуры продуктов сгорания соответственно в точках А и В, °С; $C_{\text{сг}}$ – средняя массовая теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°С).

Количество теплоты, выделяющейся при одновременной конденсации водяных паров и снижении температуры продуктов сгорания в теплофикационном экономайзере, составит

$$Q_{B-C} = L_{\text{сг}} C_{\text{сг}} (t_B - t_C) + \frac{L_{\text{сг}} (d_A - d_C) r}{1000} , \quad \text{кДж/ч} , \quad (5.5)$$

где r – теплота парообразования условно постоянная в диапазоне температур от t_A до t_C , $r = 2500$ кДж/кг.

Энтальпия продуктов сгорания в точках А, В и С рассчитывается по формулам
- в точке 1

$$I_1 = c_{\text{сг}} t_1 + d_1 r \cdot 10^{-3} , \quad \text{кДж/кг} ; \quad (5.6)$$

- в точке 2

$$I_2 = c_{\text{сг}} t_2 + d_2 r \cdot 10^{-3} \quad , \quad \text{кДж/кг} ; \quad (5.7)$$

- в точке 3

$$I_3 = c_{\text{сг}} t_3 + d_3 r \cdot 10^{-3} \quad , \quad \text{кДж/кг} . \quad (5.8)$$

Влагосодержание продуктов сгорания

- в точке 1

$$d_A = \frac{L_{\text{H}_2\text{O}}^A}{L_{\text{сг}}} \cdot 10^3 \quad , \quad \text{г/кг} ; \quad (5.9)$$

- в точке 3

$$d_C = \frac{L_{\text{H}_2\text{O}}^C}{L_{\text{сг}}} \cdot 10^3 \quad , \quad \text{г/кг} . \quad (5.10)$$

Суммарная экономия условного топлива в результате внедрения схемы «глубокого» охлаждения уходящих газов равна

$$B_{\text{ут}} = \frac{L_{\text{сг}} C_{\text{сг}} (t_A - t_C)}{Q_i^r} + \frac{L_{\text{сг}} (d_A - d_C) r}{1000 \cdot Q_i^r} \quad , \quad \text{кг/ч} \quad , \quad (5.11)$$

где Q_i^r - низшая теплота сгорания условного топлива, кДж/кг; η – КПД топки (обычно $\eta=0,9$).

Отличительной особенностью данной схемы является отсутствие дымососа, а также то, что дымовая труба монтируется над экономайзерной поверхностью, чтобы образующийся конденсат стекал в экономайзер, а затем в сборник конденсата.

Основным требованием к внедрению такой схемы является применение антикоррозионных материалов или покрытий, предупреждающих возникновение коррозии как экономайзерной поверхности, так и дымовой трубы.

Применение схемы «глубокого» охлаждения уходящих газов позволяет увеличить КПД котельной установки на 2-3 % .

В существующих схемах котельных агрегатов дымовые газы удаляются с помощью дымососа, поэтому при снижении температуры уходящих газов в дымососе и в дымовой трубе будет происходить конденсация водяных паров, которая приведёт к их разрушению (рис. 5.5а).

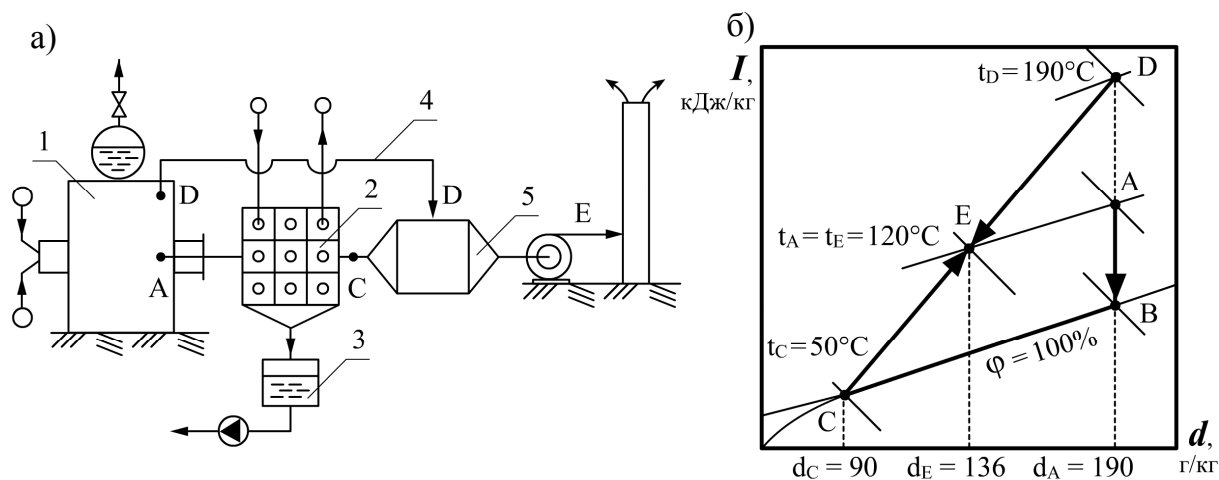


Рис. 5.5. Схема «глубокого» охлаждения уходящих газов с применением камеры смешения (а), а также процессы изменения продуктов сгорания на Id-диаграмме (б):

1 – котёл; 2 – теплофикационный экономайзер; 3 – сборник конденсата; 4 – байпасный газоход; 5 – камера смешения; A, B, C, D – параметры среды в соответствующих точках

Для предотвращения конденсации водяных паров в дымососе, газоходе «дымосос - дымовая труба» и в самой дымовой трубе предлагается устанавливать за теплофикационным экономайзером камеру смешения, в которую необходимо подавать высокотемпературные газы для получения, после смешения, температуры продуктов сгорания выше температуры точки росы и с этими параметрами направлять продукты сгорания в дымосос и дымовую трубу.

На рис. 5.5б показаны процессы изменения параметров газов в приведенной схеме. Дымовые газы с параметрами в точке А сначала охлаждаются в теплофикационном экономайзере до температуры точки росы (процесс А-В), затем происходит конденсация водяных паров с одновременным охлаждением газов (процесс В-С). Далее происходит процесс смешения отработавших и высокотемпературных газов (процесс Д-Е-С) в таком соотношении, чтобы получить начальную температуру (точка Е).

Экономический эффект в таких схемах достигается только за счёт конденсации водяных паров (5.5).

Количество теплоты, полученное при охлаждении продуктов сгорания $Q_{A-C} = L_{ст} (I_A - I_C)$ необходимо вернуть при нагревании смеси в камере смешения.

В промышленной энергетике имеются примеры разработки контактных газовых подогревателей для утилизации теплоты уходящих газов с целью повышения эффективности использования топлива и повышения КПД котельного агрегата.

5.3. Утилизация теплоты уходящих газов в контактном теплообменнике с активированными насадками (КТАН) и высокотемпературном подогревателе

Контактный газовый подогреватель представляет собой камеру прямоугольного сечения, в которой происходит нагревание воды при непосредственном соприкосновении ее с горячими дымовыми газами в слое насадки. В качестве насадки используются керамические кольца Рашига размером $50 \times 50 \times 3$. Насадка уложена в два слоя на двух решетках. Нижний слой высотой 900 мм состоит из правильно уложенных, верхний – из беспорядочно уложенных колец (рис. 5.6).

Поступающая для подогрева химически очищенная вода распределяется по сечению с помощью параллельно установленных труб с отверстиями, обеспечивая подогрев воды от 20 до 50 °С.

Однако такая схема подогрева питательной воды имеет существенные недостатки, заключающиеся в насыщении продуктов сгорания водяными парами и их конденсацией в дымососе и трубе, дополнительной очистке питательной воды от растворённых газов.

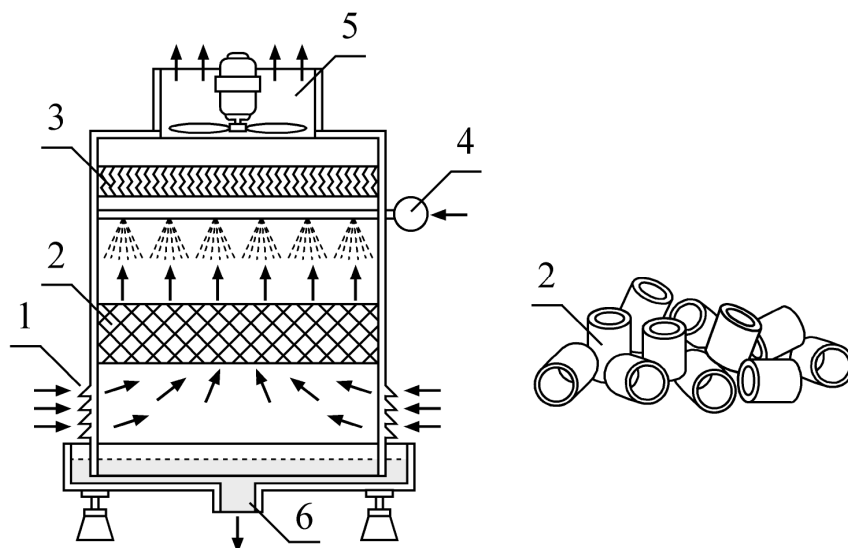


Рис. 5.6. Контактный теплообменник с активированной насадкой (КТАН):
1 – вход дымовых газов; 2 – первый слой насадки; 3 – второй слой насадки; 4 – орошающая вода; 5 – отвод газов; 6 – отвод тёплой воды

Уравнение теплового баланса контактного газового подогревателя имеет вид

$$Q_6 = L_{\Gamma} c_{\Gamma} (t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}) \varphi = L_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в} 2} - t_{\text{в} 1}) , \quad (5.15)$$

где L_{Γ} , $L_{\text{в}}$ – массовые расходы дымовых газов и воды, кг/ч; $t_{\Gamma 1}$, $t_{\Gamma 2}$ – температуры газов на входе и выходе, °C; $t_{\text{в} 2}$, $t_{\text{в} 1}$ – температуры воды на входе и выходе, °C; φ – коэффициент тепловых потерь.

Утилизация теплоты отработавших высокотемпературных газов, например, от методических печей, производится нагреванием воздуха в воздухоподогревателях с керамическими трубами (рис. 5.7).

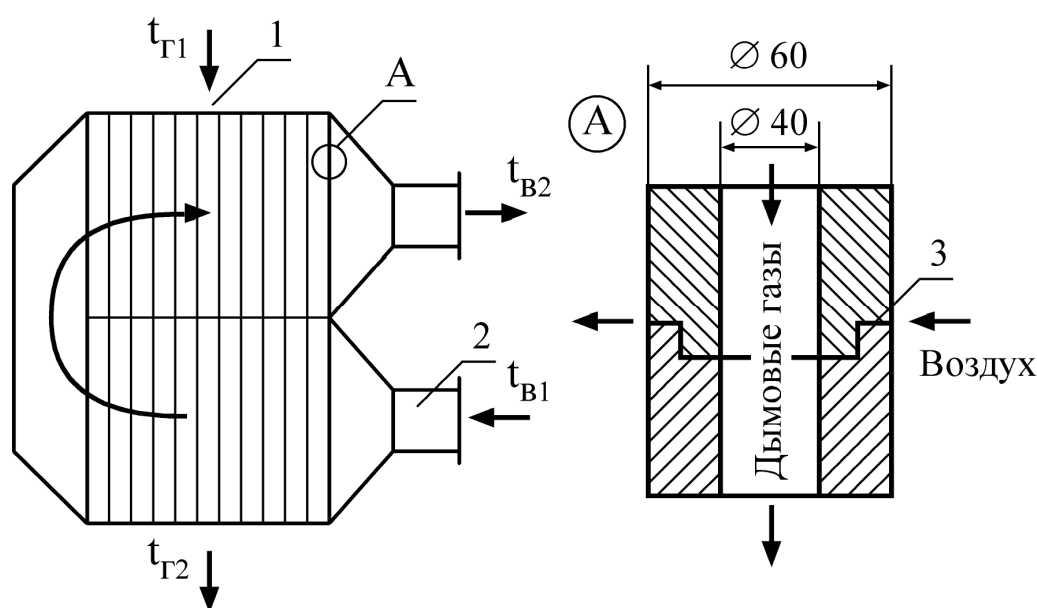


Рис. 5.7. Рекуперативный воздухоподогреватель с керамическими трубами:
1 – дымовые газы; 2 – воздух; 3 – соединение керамических труб

Однако при этом габариты воздухоподогревателя будут гораздо больше по сравнению с металлическими в связи с тем, что теплопроводность стали $\lambda_{\text{ст}} = 168 \text{ кДж/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)}$, а керамики $\lambda_{\text{к}} = 1,25 \text{ кДж/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)}$.

Уравнение теплового баланса для подогревателя имеет вид

$$Q_6 = V_{\Gamma} c_{\text{рг}} (t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}) \varphi = V_{\text{в}} c_{\text{рв}} (t_{\text{в} 2} - t_{\text{в} 1}) , \text{ кДж/ч} , \quad (5.16)$$

где V_{Γ} , $V_{\text{в}}$ – объёмные расходы продуктов сгорания и воздуха, м³/ч; $t_{\Gamma 1}$, $t_{\Gamma 2}$ – температуры продуктов сгорания, °C; $t_{\text{в} 2}$, $t_{\text{в} 1}$ – температуры воздуха, °C; $c_{\text{рг}}$, $c_{\text{рв}}$ – теплоёмкости газов и воздуха, кДж/(м³·°C); φ – коэффициент тепловых потерь.

Поверхность воздухоподогревателя равна

$$F = \frac{Q_{\delta}}{k\Delta t} = \frac{V_{\text{г}} c_{\text{пр}} (t_{\text{г1}} - t_{\text{г2}}) \varphi}{k\Delta t}, \text{ м}^2. \quad (5.17)$$

Коэффициент теплопередачи можно рассчитывать по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5.18)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от газового потока к внутренней поверхности труб и от наружной поверхности к потоку воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; Δt – температурный напор, $^\circ\text{C}$; δ – толщина стенки трубы, м.

Экономическая целесообразность применения воздухоподогревателей такого типа определяется снижением расхода топлива для данной установки, который определится по формуле

$$B_{\text{эк}} = \frac{Q_{\text{эк}} \cdot 3}{Q_{\text{г}}^{\text{г}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.19)$$

где $Q_{\text{эк}}$ – сэкономленное количество теплоты, $\text{кДж}/\text{ч}$; $Q_{\text{г}}^{\text{г}}$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; η – КПД энергетической установки.

Годовой экономический эффект равен

$$S = k_1 k_2 C_{\text{т}}, \text{ руб/год}, \quad (5.20)$$

где k_1 – число часов работы установки в сутки, ч; k_2 – число дней работы установки в году, дн.; $C_{\text{т}}$ – стоимость единицы топлива, руб/ед.топлива.

6. Энергосбережение при сжигании органических отходов целлюлозно-бумажного производства

6.1. Элементный состав и теплота сгорания органических отходов

В табл. 6.1 приведены элементный состав и теплота сгорания сухой массы вторичных топлив (кроме серы), образующиеся при механической и химической переработке древесины при производстве целлюлозы.

Содержание углерода, который является основным горючим элементом в сухой массе, в приведенных топливах колеблется от 41 % в сульфатном и сульфитном щелоках, до 60 % в лигнине. Пропорционально содержанию углерода в элементном составе изменяется и теплота сгорания топлива.

Водород является вторым по значению компонентом в элементном составе топлива. Максимальное содержание водорода имеет место у шлама и биологического ила (6,5 %) и минимальное – у сульфатного щелока.

Кислорода, являющегося внутренним балластом топлива, много в древесной коре – 38,5 %, а в дровах – 42 %.

До 10 % азота содержится в сухой массе вторичных топлив (сульфатный щелок, шлам и биологический ил). Топлива, имеющие в своем составе много азота, обладают низкой теплотой сгорания.

Таблица 6.1

Элементный состав и теплота сгорания вторичных топлив ЦБП

Вторичные топливные ресурсы	Элементный состав ВТР, %							W^r , %	Q_{is}^d , кДж/кг (ккал/кг)
	V^{daf}	C^d	H^d	O^d	N^d	S^d	A^d		
Древесная кора	82	49	5,0	38,5	0,5	0,2	6,8	65	18860 (4500)
Лигнин	75	60	6,0	27	2,0	3,0	2,0	60	19700 (4700)
Биоил, шлам	85	45	6,5	24,5	10	1,0	13	65	15000 (3580)
Сульфатный щелок	65	41	4,0	16	10	3,0	35	40-50	15900 (3800)
Сульфитный щелок	87	41	5,0	33	0,5	3,5	17	50	16970 (4050)
Сера	-	-	-	-	-	100	-	-	12570 (3000)

При элементном анализе вторичных топлив не разделяют общую серу на органическую и колчеданную, а суммарное содержание серы невелико – колеблется от 0,2 % до 3,5 %, и при сжигании вторичных топлив не создают особых трудностей.

Реакционная способность различных топлив, в том числе и вторичных, характеризуется выходом летучих горючих веществ при нагревании без доступа воздуха, состоящих из молекулярного водорода, окислов углерода, метана и других соединений.

Все вторичные топлива обладают высоким выходом летучих горючих веществ в пределах от 75 % (лигнин) до 85 % (биологический ил и шлам).

Как правило, зола всех видов вторичного топлива (кроме коры) может использоваться в технологических процессах.

Вторичное топливо относится к высоковлажным топливам ($W^r=50-65\%$), поэтому требуется его обезвоживание прессованием, центрифугированием или другими механическими способами. Термический способ обезвоживания (сушка) является весьма дорогостоящим, поэтому применяется редко.

Наиболее важной теплотехнической характеристикой топлива является теплота его сгорания (теплотворная способность), т.е. количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы твердого или жидкого топлива (кДж/кг) или единицы объема газообразного (кДж/м³). Теплоту сгорания, также как и элементный состав, относят к рабочей, сухой или горючей массе топлива: Q^r , Q^d , Q^{daf} .

В зависимости от того, в каком состоянии (жидком или газообразном) находятся в продуктах сгорания водяные пары, различают *высшую* Q_s и *низшую* Q_i теплоту сгорания (индексы s от англ. superior – высший, i – inferior – низший). *Высшей теплотой сгорания* Q_s называют максимальное количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы количества топлива (1 кг – твердое или жидкое, 1 м³ – газообразное) с учетом теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания.

В реальных промышленных установках температура уходящих газов (из технико-экономических соображений) превышает температуру конденсации водяного пара, а, следовательно, теплота его конденсации не используется. Поэтому во всех практических расчетах в качестве показателя теплотворной способности топлива применяют так называемую *низшую теплоту сгорания* Q_i . Таким

образом, низшая теплота сгорания Q_i получается вычитанием из теплоты сгорания высшей Q_s теплоты конденсации водяных паров, которые образуются при испарении влаги, содержащейся в топливе, а также при сгорании водорода топлива.

Анализ показывает, что все вторичные топлива имеют низкую теплоту сгорания. Из приведенных топлив достаточно высокое значение по сухой массе имеет лигнин ($Q_i^r = 16693$ кДж/кг), но при влажности 60 % по рабочей массе низшая теплота сгорания становится равной

$$\begin{aligned} Q_{i2}^r &= \frac{1}{100} [Q_i^d (100 - W^r) - W^r r] = \\ &= \frac{1}{100} \cdot [17693 \cdot (100 - 60) - 2500 \cdot 60] = 6369 \text{ кДж/кг}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

где r – теплота парообразования, $r = 2500$ кДж/кг.

При увеличении влажности лигнина до 60 % низшая теплота сгорания уменьшается в три раза.

Каждое вторичное топливо характеризуется высокой влажностью, низкой теплотой сгорания и другими характерными свойствами. Поэтому для каждого вида топлива разработаны и эксплуатируются устройства для подготовки и сжигания различных топлив, удовлетворяющие техническим и теплотехническим процессам.

Хотя вторичные топлива ЦБП имеют низкую калорийность и высокую влажность, они являются основным источником энергии как для технологии, так и для отопления и горячего водоснабжения рабочего поселка или города.

6.2. Энергосбережение при сжигании лигнина

Лигнин является отходом гидролизно-дрожжевого производства, получаемым при химической переработке непищевых растительных материалов путем каталитического превращения полисахаридов в моносахариды. Таким способом вырабатываются кормовые дрожжи, этиловый спирт, глюкоза, ксилит, фурфурол и другие вещества.

После пропитки и варки древесных опилок в растворе сернистой кислоты остаток (клетчатка древесины) подлежит утилизации чаще всего сжиганием в топках паровых котлов.

Состав горючей массы лигнина следующий, % :

$C^{\text{daf}} = 64$, $H^{\text{daf}} = 6,04$, $N_2 = 1,76$; $O_2 = 27,5$, $A^{\text{daf}} = 1$; выход летучих веществ $V^{\text{daf}} = 58-60$; теплота сгорания сухой массы лигнина $Q_i^{\text{d}} = 25366$ кДж/кг (6054 ккал/кг).

Влажность лигнина после гидролизных аппаратов достигает 58-60 %, при этом низшая теплота сгорания и температура горения недостаточны для стабильного горения в топках котельных агрегатов. По этой причине для устойчивого горения лигнина необходимо снизить влажность лигнина до 45-50 %. Начало деформации золы $t = 1150$ °С, начало размягчения $t = 1180$ °С. Отличительная особенность лигнина как топлива заключается в трудности организации его сжигания: при влажности 58-60 % лигнин горит неустойчиво, а сухой лигнин взрывается.

Перерасчет теплоты сгорания с сухой массы на другую влажность можно произвести по формуле

$$Q_i^{\text{r}} = \frac{1}{100} [Q_i^{\text{d}} (100 - W) + r] , \text{ кДж/кг} , \quad (6.2)$$

где Q_i^{d} – теплота сгорания лигнина по сухой массе, кДж/кг; r – теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг.

В настоящее время на предприятиях целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности накоплен положительный опыт сжигания лигнина факельным способом со схемами подготовки к сжиганию по разомкнутому и замкнутому циклам, а также с применением пылеконцентраторов.

Сущность разомкнутого цикла заключается в использовании отработавших в котельной установке продуктов сгорания для подсушки влажного лигнина в пневматической, циклонной или аэрофонтанной сушилках (рис. 6.1). В такой схеме достигаются наиболее благоприятные условия для организации сжигания высоко-влажных топлив, отработавшие в сушильной установке дымовые газы совместно с водяными парами подвергаются очистке в циклонах и выбрасываются в атмосферу.

Подсушенное продуктами сгорания топливо с помощью эжектора подается в топку для сжигания, при этом в топке создаются значительно лучшие условия для горения лигнина – повышается температура и, соответственно, скорость горения. Положительной стороной такой схемы является также более полное использование

теплоты отходящих газов, повышение КПД за счет снижения температуры уходящих газов в сушилке до 110-115 °С.

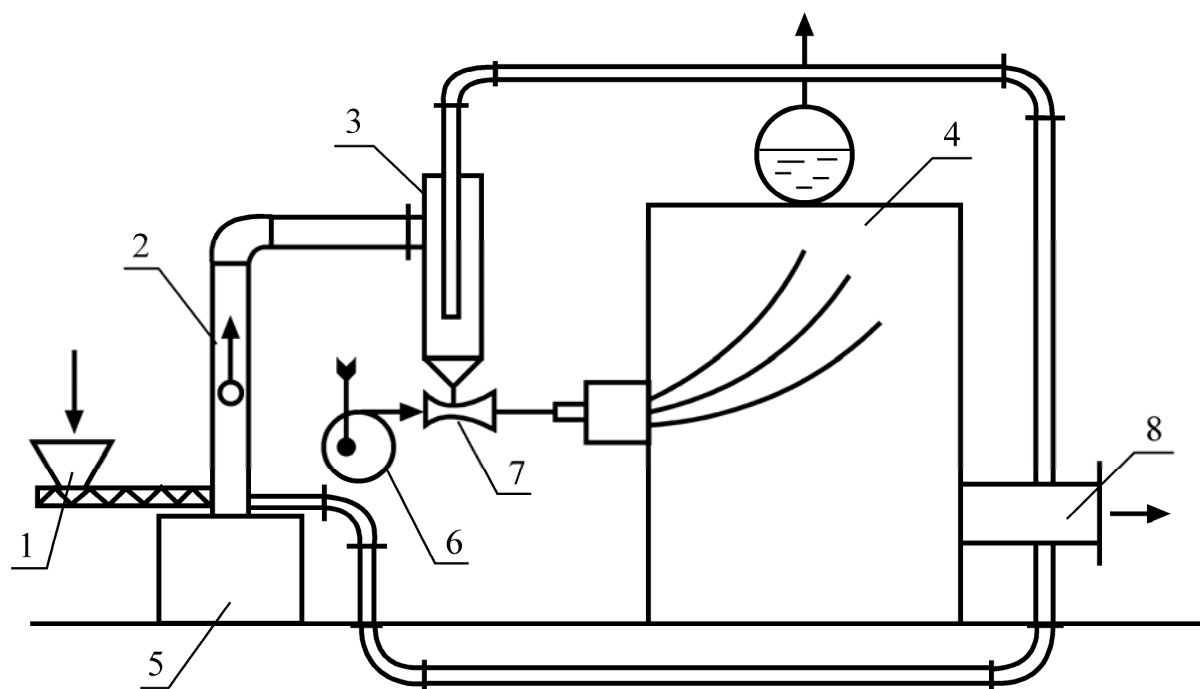


Рис. 6.1. Схема подготовки к сжиганию лигнина по разомкнутому циклу: 1 – подача влажного лигнина; 2 – труба-сушилка; 3 – циклон; 4 – котел; 5 – вспомогательная топка для сжигания крупных фракций; 6 – вентилятор; 7 – инжектор; 8 – удаление продуктов сгорания

Основными недостатками схемы сжигания лигнина по разомкнутому циклу являются усложнение схемы пылеприготовления и ввод в схему таких элементов, как эжектор. Возникают трудности, связанные с улавливанием уноса и очисткой отработавшего сушильного агента, выбрасываемого в атмосферу, загрязнением окружающей среды и возможностью скопления пыли и взрывов в газоходах котлоагрегата. Частицы, у которых скорость газов оказалась больше скорости витания, поднимаются вверх, а частицы, у которых скорость газов меньше скорости витания, выпадают из потока во вспомогательную топку, расположенную в нижней части трубы-сушилки для дожигания крупных частиц топлива.

Отсепарированная в циклоне твердая фракция топлива попадает сначала в инжектор, а затем в горелку и в топку, где воспламеняется и сгорает. Недостатком таких схем является большой унос топлива в атмосферу, определяемый КПД циклона (96-98 %). Установка дополнительных газоочистных устройств связана с затратой энергии.

На рис. 6.2 приведена схема подготовки лигнина к сжиганию по замкнутому циклу, которая включает в себя мельничный вентилятор, рециркуляционный газоход с автоматическим клапаном и топливную шахту значительной высоты.

Влажный лигнин при помощи питателя подается в топливную шахту, сюда же поступают и высокотемпературные продукты сгорания, забираемые из верхней зоны топки котельного агрегата, образуя спутное движение топлива и сушильного агрегата. С помощью мельничного вентилятора подсушенный лигнин и сушильный агент подаются в топку котельного агрегата.

Существенным недостатком такой схемы подготовки влажного лигнина и его сжигания является высокое содержание в топке инертных газов, снижающее скорость горения топлива, увеличение химической и механической неполноты сгорания из-за недостатка кислорода.

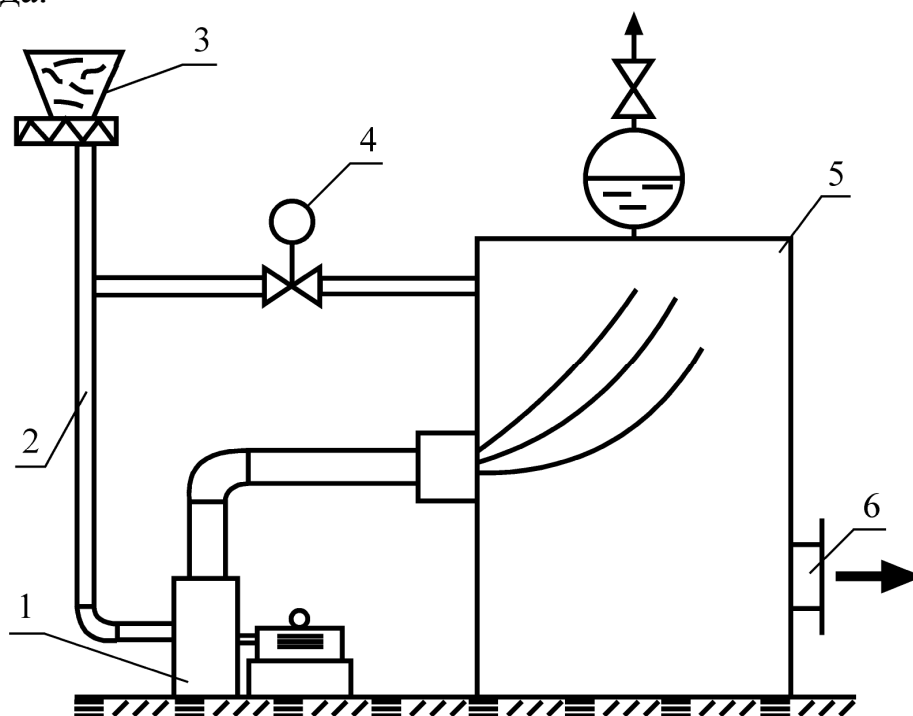


Рис. 6.2. Схема подготовки к сжиганию лигнина по замкнутому циклу:
1 – мельничный вентилятор; 2 – труба-сушилка; 3 –подача влажного лигнина; 4 – клапан-регулятор расхода высокотемпературных газов; 5 – котел; 6 – отвод продуктов сгорания

Экономическая эффективность сжигания лигнина определяется количеством вырабатываемого пара по формуле

$$D_{\text{пе}} = \frac{B_{\text{л}} Q_{\text{i}}^{\text{r}} z_{\text{ка}}}{i'' - i_{\text{пв}}} , \text{ кг/ч} , \quad (6.3)$$

где $B_{\text{л}}$ – расход сжигаемого лигнина, кг/ч; $Q_{\text{л}}^{\text{r}}$ – низшая теплота сгорания лигнина при соответствующей влажности, кДж/кг; $\eta_{\text{ка}}$ – КПД котельного агрегата; i'' – энтальпия пара на выходе из котла, кДж/кг; $i_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг.

Если на тепловой станции выработка энергии производится по комбинированной схеме и полученный пар направляется в паровую турбину, то тогда вырабатываемая мощность рассчитывается по формуле

$$N_{\text{э}} = \frac{D_{\text{пе}} \Delta h \cdot \eta_{\text{oi}} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{э}}}{3600}, \text{ кВт}, \quad (6.4)$$

где Δh – срабатываемый перепад в турбине, $\Delta h = i'' - i_{\text{п}}$, кДж/кг; i'' – энтальпия пара, поступающего в турбину, кДж/кг; $i_{\text{п}}$ – энтальпия пара в противодавлении или в отборе, кДж/кг; η_{oi} , $\eta_{\text{м}}$, $\eta_{\text{э}}$ – соответственно КПД внутренний относительный, механический и электрический.

6.3. Энергосбережение при сжигании биологического ила

Активный биологический ил образуется в процессе очистки сточных вод на очистных сооружениях. Смесь сточных вод и активного ила аэрируется в течение 6-12 часов, после чего направляется во вторичные отстойники, в которых ил осаждается, а осветленная очищенная вода спускается в водоем. В результате размножения микроорганизмов количество ила постепенно увеличивается, а избыток направляется на сжигание.

С физико-химической точки зрения активный ил представляет собой вещество, которое в условиях аэротенка имеет влажность 99,0 - 99,9 %, а зольность по сухой массе 13-46 %. В составе ила находится 20-30 % волокна, а в отдельных случаях его содержание достигает 40-48 %.

В табл. 6.2, 6.3 приведен состав активного ила в пересчете на абсолютно сухое вещество.

Данные химического состава, приведенные в табл. 6.2, показывают, что в абсолютно сухом иле содержится около 80 % органических соединений. Это дает основание использовать биологический ил в качестве вторичного топлива (при умеренной влажности), для получения тепловой энергии.

Таблица 6.2

Химический состав абсолютно сухого вещества активного ила, %

Азот	Протеин	Жир	Клетчатка	Белки	Зола
4,21	26,31	4,32	22,30	47,07	15,10

Таблица 6.3

Минеральный состав части активного ила

Зола, %	Микроэлементы, г/кг							
	кальций	фосфор	калий	натрий	железо	марганец	медь	цинк
15,10	10,94	7,81	5,66	6,18	10500	600	300	200

Биологический ил по рабочей массе имеет следующий элементный состав, % :

углерод $C^r = 19,51$; кислород $O^r = 10,79$;
 водород $H^r = 3,14$; азот $N^r = 4,42$;
 сера $S^r = 0,56$; зола $A^r = 5,6$;
 влага $W^r = 55$.

Низшая теплота сгорания биологического ила

$$Q_1^r = 12570-15920 \text{ кДж/кг, (3000 – 3800 ккал/кг).}$$

На рис. 6.3 показана схема сжигания биоила. Она состоит из камеры сгорания, воздухоподогревателя, скруббера для очистки продуктов сгорания и тягодутьевого оборудования.

Предварительно обезвоженный на вакуум-фильтрах ил до относительной влажности $W=75-85$ % через верхнюю горловину подается на воздухораспределительную решетку. Кварцевый песок подается в камеру сгорания и удаляется из нее с помощью шнекового питателя. Образовавшиеся продукты сгорания сначала направляются в воздухоподогреватель, а затем в скруббер и далее в дымовую трубу. Дутьевой воздух в воздухоподогревателе нагревается до температуры $150-200$ °С и далее подается под воздухораспределительную решетку.

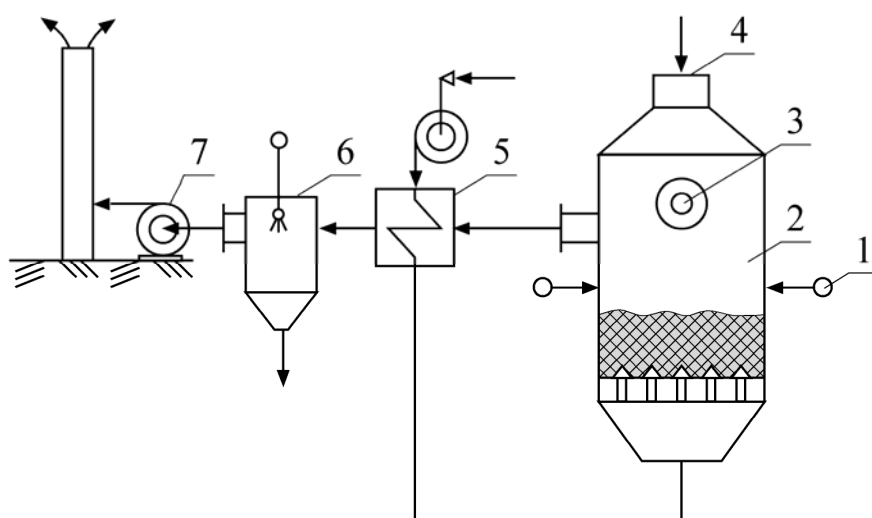


Рис. 6.3. Тепловая схема сжигания биологического ила:
 1 – вторичное дутьё; 2 – топка кипящего слоя;
 3 – растопочная горелка; 4 – подача влажного ила;
 5 – воздухоподогреватель; 6 – скруббер; 7 – дымосос

Тепловое напряжение объема камеры сгорания ила достаточно высокое и равно

$$q_v = \frac{B_T Q_i^d}{V_T} = (420 - 620) \cdot 10^3, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}). \quad (6.5)$$

Напряжение зеркала горения камеры сгорания ила равно

$$q_R = \frac{B_T Q_i^r}{R} = (55 - 65) \cdot 10^5, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (6.6)$$

Основная сложность утилизации биоила состоит в том, что в результате его сжигания образуются мелкодисперсные минеральные частицы, которые оседают на поверхностях нагрева и газоходах.

Энергосбережение при сжигании биологического ила заключается в его утилизации без дополнительной затраты для подсветки натуральных видов топлива. Для этого необходимо как можно полнее использовать теплоту уходящих газов и возвращать ее в камеру сгорания, а также снижать другие потери теплоты.

Уравнение теплового баланса рабочей камеры имеет следующий вид

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{ кДж}/\text{ч}. \quad (6.7)$$

Теплота, поступающая в рабочую камеру вместе с топливом равна

$$Q_1 = B_T (Q_i^r + C_T t_T), \text{ кДж/ч}, \quad (6.8)$$

где Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива при соответствующей влажности, кДж/кг; C_T – теплоёмкость биологического ила, $C_T = C_{ст} + C_w U$, кДж/(кг·°C); $C_{ст}$ – теплоёмкость сухого ила, кДж/(кг·°C); C_w – теплоёмкость влаги, кДж/(кг·°C); U – влагосодержание биологического ила, кг/кг; t_T – температура топлива, поступающего в рабочую камеру, °C.

Теплота, поступающая в рабочую камеру вместе с дутьевым воздухом

$$Q = B_T \beta_T V_B^0 C_B t_B, \text{ кДж/ч}, \quad (6.9)$$

где β_T – коэффициент избытка воздуха в рабочей камере; V_B^0 – теоретически необходимый расход воздуха для горения топлива, м³/кг.

Теплота, поступающая в рабочую камеру с песком

$$Q_3 = G_{п} C_{п} t_{п1}, \text{ кДж/ч}, \quad (6.10)$$

где $G_{п}$ – массовый расход песка, кг/ч; $C_{п}$ – теплоёмкость песка, кДж/(кг·°C); $t_{п1}$ – температура песка при загрузке, °C.

Теплота уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания

$$Q_4 = B_T V_{г} \bar{C}_{г} (t_{ух} - t_{окр}), \text{ кДж/ч}, \quad (6.11)$$

где B_T – расход топлива (биологического ила), кг/ч; $V_{г}$ – объёмный расход продуктов сгорания, м³/кг; $\bar{C}_{г}$ – средняя объёмная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(м³·°C); $t_{ух}$ – температура уходящих газов, °C; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °C.

Потери теплоты в окружающую среду через стенки реактора

$$Q_5 = k F \Delta t, \text{ кДж/ч}, \quad (6.12)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $k = 15-50$ кДж/(м²·°C); F – поверхность теплообмена реактора, м²; Δt – температурный напор, $\Delta t = (t_p - t_{окр})$, °C; t_p – температура в камере сгорания, °C; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °C.

Потери теплоты с отработавшим песком

$$Q_6 = G_{п_2} C_{п_2} t_{п_2}, \quad \text{кДж/ч}, \quad (6.13)$$

где $G_{п_2}$ – массовый расход выгружаемого песка, кг/ч; $C_{п_2}$ – массовая теплоемкость песка, кДж/(кг·°C); $t_{п_2}$ – температура выгружаемого песка, °C.

Приходные и расходные статьи подставляем в уравнение теплового баланса

$$\begin{aligned} B_T (Q_i^r + C_T t_T) + B_T \beta_T V_B^0 C_B t_B + G_{п_1} C_{п_1} t_{п_1} = \\ = B_T V_T \bar{C}_T (t_{yx} - t_{окр}) + k F \Delta t + G_{п_2} C_{п_2} t_{п_2}, \quad \text{кДж/ч}. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Из уравнения (6.14) находим расход топлива

$$B_T = \frac{k F \Delta t + G_{п_2} C_{п_2} t_{п_2}}{Q_i^r + C_T t_T + \beta_T V_B^0 C_B t_B - \bar{V}_T \bar{C}_T (t_{yx} - t_{окр})}, \quad \text{кг/ч}. \quad (6.15)$$

Основная задача при проектировании и эксплуатации такого рода установок заключается в том, чтобы не затрачивать на утилизацию натуральные виды топлива, в этом заключается экономический эффект энергосбережения при сжигании биологического ила. Главная трудность утилизации биологического ила методом сжигания заключается в его высокой влажности, поэтому в схеме (рис. 6.4.) применена многополочная сушилка, в которой биоил под действием гравитационных сил пересыпается с одной полки на другую, совершая движения сначала от центра к периферии, а затем от периферии к центру.

Другая трудность связана с большим уносом минеральной части и осаждением в газоходах и теплообменных аппаратах.

В нижней части установки располагается топочная камера, в которой ил сжигается в кипящем слое. Для включения установки в работу имеется пусковая камера, в которой сжигается мазут для получения высокотемпературных газов.

Для промышленности представляет интерес совместное сжигание в кипящем слое шлама сточных вод и корьевых отходов, характеристики которых приведены в табл. 6.4.

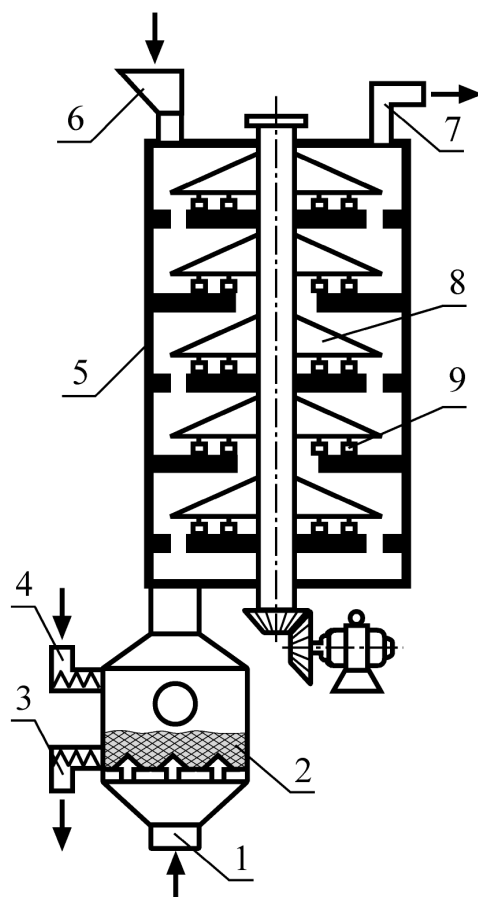


Рис. 6.4. Схема сушилки биологического ила и топки с кипящим слоем:
 1 – подвод дутьевого воздуха для горения; 2 – кипящий слой;
 3 – выгрузка золы и песка; 4 – загрузка песка;
 5 – многополочная сушилка; 6 – загрузка биологического ила;
 7 – отвод продуктов сгорания; 8 – грабли для перемешивания
 ила; 9 – гребки

Таблица 6.4

Теплофизические характеристики осадка сточных вод
и корьевых отходов

Теплофизические характеристики	Шлам	Кора
Теплота сгорания сухого топлива, кДж/кг (ккал/кг)	16295(3889)	20321,5(4850)
Низшая теплота сгорания, кДж/кг (ккал/кг)	3679 (878)	6738 (1608)
Состав топлива, %:		
влага	65	57,1
зола	30	2,5
летучие горючие вещества	48,6	80
связанный углерод	22	175

При совместном сжигании шлама и корьевых отходов решаются две задачи: утилизация отходов, а также защита окружающей среды от окислов азота (NO_2) и оксида серы (SO_2) из-за низкой температуры горения смеси этих топлив ($t_{\text{г}} = 750\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При сжигании такого вида вторичных топлив в котельной установке должны быть предусмотрены устройства для очистки дымовых газов и поверхностей нагрева котельной установки.

6.4. Энергосбережение при сжигании серы

Установка для сжигания серы и получения сернистой кислоты состоит из плавильного бункера, циклонной камеры сгорания, котла-утилизатора и скруббера, в котором поглощается сернистый ангидрид SO_2 холодной водой с образованием сернистой кислоты H_2SO_3 . Сера загружается в плавильный бункер, где при температуре $t_{\text{пл}} = 130\text{-}140\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит плавление твердой серы. Полученная жидкая сера обладает хорошей текучестью и насосом подается в механическую форсунку для распыливания (рис. 6.5).

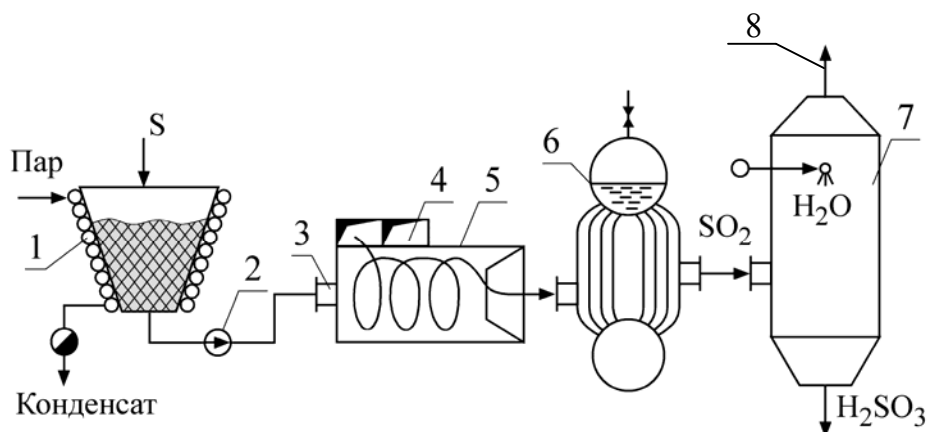


Рис. 6.5. Теплотехническая установка для сжигания серы и получения сернистой кислоты:

- 1 – бункер для расплавления серы; 2 – серный насос; 3 – горелка;
- 4 – воздух для горения; 5 – циклонная топка; 6 – котел-утилизатор;
- 7 – скруббер; 8 – уходящие газы

Сжигание серы производится в циклонной камере, где под действием тангенциально направленных струй воздуха образуется вихревое движение продуктов сгорания, способствующее увеличению скорости горения серы. Применение циклонной камеры сгорания позволяет поддерживать высокое тепловое напряжение топки [$730 \cdot 10^3$ кДж/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$) или $1742 \cdot 10^3$ ккал/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$)], коэффициент избытка

воздуха в пределах 1,1-1,15 и увеличивать содержание сернистого ангидрида в продуктах сгорания до 18 %.

Низшая теплота сгорания серы составляет $Q_i^r = 10900$ кДж/кг (2600 ккал/кг).

Из циклонной камеры сгорания продукты горения серы с температурой 1200-1400 °С направляются в котел-утилизатор, где они охлаждаются до $t_2 = 300-350$ °С. Далее продукты сгорания поступают в скруббер-поглотитель сернистого ангидрида SO_2 с образованием сернистой кислоты



Уравнение теплового баланса котла-утилизатора имеет следующий вид

$$L_r C_r (t_{r1} - t_{r2}) \varphi = D_{п} (i'' - i_{пв}), \text{ кДж/кг}, \quad (6.17)$$

где L_r – массовый расход продуктов сгорания, кг/ч; t_{r1} , t_{r2} – температура продуктов сгорания до и после котла-утилизатора, °С; φ – коэффициент тепловых потерь, $\varphi = 0,97-0,98$; i'' , $i_{пв}$ – энтальпии сухого насыщенного пара и питательной воды, кДж/кг.

Расход пара, полученного в результате охлаждения продуктов сгорания в котле-утилизаторе, равен

$$D_{п} = \frac{L_r C_r (t_{r1} - t_{r2}) \cdot \varphi}{i'' - i_{пв}}, \text{ кг/ч} \quad . \quad (6.18)$$

Полученный расход пара в результате охлаждения продуктов сгорания серы является результатом энергосбережения в производстве сульфитной целлюлозы.

6.5. Энергосбережение при сжигании сульфитных щелоков на магниевом основании

Отработавший сульфитный щелок, барда и концентраты (табл. 6.5) на магниевом основании подвергаются регенерации в котельных агрегатах различной конструкции. По данным ОАО «НПО ЦКТИ» сульфитные щелока хорошо горят в любых топочных устройствах в диапазоне концентраций сухого остатка в пределах от 45 до 60 %. На рис. 6.6 приведена схема котельного агрегата МР-500 с циклонными предтопками. Жидкий щелок распыливается механической форсункой, далее капли щелока попадают в вихревое движение воздуха и продуктов сгорания, в результате чего достигается высокое напряжение топочного объема циклонной камеры сгорания.

Таблица 6.5

Элементный состав сухого остатка сульфитного щелока, барды и концентрата

Наименование	Элементный состав по сухой массе, %					Q_s^r , кДж/кг
	C^d	H^d	S^d	O^d	A^d	
Сульфитный щелок	43,55	5,03	2,4	36,92	12,1	4563
Барда	42,4	4,8	2,07	39,13	11,6	4322
Концентрат	45,2	4,09	2,51	33,7	14,5	4000

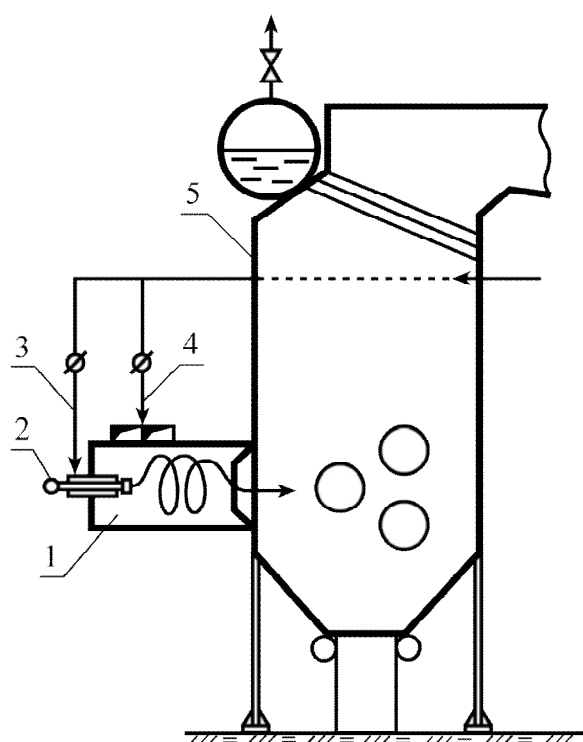
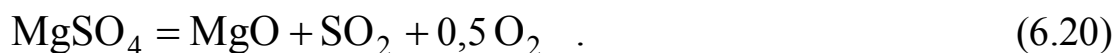


Рис. 6.6. Котельный агрегат МР-500 для сжигания сульфитных щелоков на магниевом основании:

- 1 – циклонная топка; 2 – подача щелока; 3 – первичный воздух;
4 – вторичный воздух; 5 – паровой котел

Низшая теплота сгорания щелока при изменении его влажности от 45 до 50 % колеблется в пределах от 5028 до 5860 кДж/кг. Основные химические реакции по образованию окиси магния при высокой температуре протекают следующим образом



7. Энергетическое использование корьевых и древесных отходов

7.1. Состав и теплота сгорания коры и древесных отходов

В целях получения качественной целлюлозно-бумажной продукции перед технологической переработкой древесину предварительно подвергают окорке в окорочных барабанах. Недостатком корьевых отходов как вторичного топлива после окорочного барабана является высокая их влажность и неравномерный фракционный состав, поэтому перед сжиганием необходимо производить подготовку, заключающуюся в снижении влажности в прессах и фракционировании в рубительных машинах.

Кора представляет собой наружную многослойную ткань древесины, состоящую из корки и луба. В общем объёме древесины она занимает 8-12 % у ели и сосны, 12-20 % у берёзы и осины.

Элементный состав корьевых отходов и теплота их сгорания зависит от породы древесины, возраста, места произрастания и других факторов. Приближенный элементный состав и теплота сгорания коры, которые приведены в табл. 7.1, близки к древесине.

Таблица 7.1

Элементный состав и теплота сгорания рабочей массы
коры и древесины при влажности 55 %

Показатели	Обозначения	Кора	Древесина
Влажность	W_t^r , %	55,0	55,0
Зольность	A^r , %	1,6	0,45
Сера	S^r , %	0,17	-
Углерод	C^r , %	22,7	22,7
Водород	H^r , %	2,6	2,7
Азот	N^r , %	-	0,30
Кислород	O^r , %	17,9	18,8
Низшая теплота сгорания	Q_i^r , кДж/кг, (ккал/кг)	7157,5 (1708)	7039 (1680)
Высшая теплота сгорания	Q_s^r , кДж/кг, (ккал/кг)	8637,3 (2061,4)	9032,8 (2155,8)

Элементный состав коры так же, как и натуральных видов топлива, может быть выражен в рабочей, сухой и горючей массе. Кора в том виде, в котором она поступает на сжигание, называется рабочей массой, а элементный состав имеет следующий вид

$$C^r + H^r + N^r + O^r + S_o^r + A^r + W_t^r = 100\% \quad , \quad (7.1)$$

где $C^r, H^r, N^r, O^r, S_o^r, A^r, W_t^r$ – содержание углерода, водорода, азота, кислорода, серы, золы и влаги по рабочей массе.

Основной горючей составляющей коры является углерод, горение которого обуславливает выделение основного количества энергии, и теплота сгорания которого составляет 7157,5 кДж/кг (1757 ккал/кг).

Кислород, содержащийся в корьевых отходах, как и в любом топливе, является органическим балластом, так как его присутствие уменьшает содержание горючих элементов в топливе. Кроме того, кислород, находясь в соединении с водородом или с углеродом топлива, переводит его некоторую часть в окислившееся состояние, тем самым снижая теплоту сгорания.

В коре может содержаться сера только органического происхождения, так как она входит в состав сложных высокомолекулярных соединений топлива. Содержание серы в коре невелико, а в некоторых породах древесины отсутствует.

Содержание влаги в корьевых отходах колеблется в широких пределах от 8-10 % до 90 % в зависимости от способов транспортировки и окорки древесины, а также условий хранения. В своем составе кора содержит в основном физико-механически связанную влагу, т.е. влагу, заполняющую поры и капилляры, которые в коре сильно развиты. Физико-механическая влага попадает в топливо при непосредственном соприкосновении с водой. Перед сжиганием частично она может быть удалена прессованием или сушкой.

Повышенная влажность снижает энергетическую ценность коры как топлива в результате уменьшения теплоты сгорания и потерь теплоты с уходящими газами. Кроме того, повышенная влажность коры создает дополнительные трудности при ее транспортировке, перемещении в бункерах и течках в результате ухудшения ее сыпучести, а также уменьшает температуру горения топлива.

Основной теплофизической характеристикой, определяющей энергетическую ценность любого вида топлива, в том числе и коры, является теплота сгорания. Низшая теплота сгорания корьевых

отходов Q_i^r – это количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг коры при условии, что образующиеся водяные пары, на которые затрачена теплота парообразования, не используются и отводятся в атмосферу.

Высшая теплота сгорания коры Q_s^r – это количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг коры при условии, что на испарение влаги теплота не затрачивается.

По данным В.В. Померанцева несколько иные значения: высшая теплота сгорания древесины ели равна 20100 кДж/кг (4798 ккал/кг), а коры – 20330 кДж/кг (4853 ккал/кг); для берёзовой древесины – соответственно 19640 кДж/кг (4688 ккал/кг) и 22970 кДж/кг (5482,1 ккал/кг).

В практических расчетах часто приходится производить перерасчеты с известных влажности $W_{t_1}^r$ и низшей теплоты сгорания $Q_{i_1}^r$ на другую теплоту сгорания $Q_{i_2}^r$ при заданной влажности $W_{t_2}^r$, которые производятся по формуле

$$Q_{i_2}^r = (Q_{i_1}^r + 25,14 W_{t_1}^r) \cdot \frac{100 - W_{t_2}^r}{100 - W_{t_1}^r} - 25,14 W_{t_2}^r, \text{ кДж/кг.} \quad (7.2)$$

Расчеты показывают, что при влажности коры примерно 82 % теплота, выделяющаяся в результате горения в адиабатических условиях, расходуется только на испарение содержащейся в ней влаги и энергетическая ценность коры становится равной нулю. Для увеличения энергетической ценности корьевых отходов перед сжиганием уменьшают их влажность путём прессования, а для организации устойчивого горения подают дутьевой воздух с температурой 350-400 °С, чтобы тепловыделение в результате горения превышало теплоотвод экранными трубами и в окружающую среду. Для корьевых и древесных отходов действительная температура горения должна быть на уровне 950-1050 °С.

Качество любого топлива, в том числе и корьевых отходов, оценивается в сравнении с условным топливом, теплота сгорания которого равна 29330 кДж/кг (7000 ккал/кг). Тогда тепловой эквивалент равен

$$\Xi = \frac{Q_i^r}{29330}. \quad (7.3)$$

Повышенная влажность корьевых отходов оказывает существенное влияние на устойчивость процессов воспламенения и горения, обусловленные теоретической температурой горения, которая определяется из соотношения

$$t_a = \frac{Q_T}{V_r C_{cp}} = \frac{Q_p \frac{100 - q_3 - q_4 - q_5}{100 - q_4} + Q_{фв}}{[V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha_T - 1)V^0] C_{cp}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.4)$$

где Q_T – тепловыделение в топке, кДж/кг; Q_p – рабочая расчётная теплота сгорания топлива, кДж/кг; V_r – объём продуктов сгорания, м³/кг; C_{cp} – средняя теплоёмкость продуктов сгорания топлива, кДж/(кг·°C); V_{RO_2} – объём трёхатомных газов, м³/кг; $V_{N_2}^0$ – теоретический объём азота, м³/кг; $V_{H_2O}^0$ – теоретический объём водяных паров, м³/кг; α_T – коэффициент избытка воздуха в топке; V^0 – теоретический объём воздуха для горения топлива, м³/кг; q_3, q_4, q_5 – потери теплоты от химической неполноты сгорания, от механической неполноты сгорания и в окружающую среду, %; $Q_{фв} = \alpha_T V^0 t_b C_b$ – физическая теплота дутьевого воздуха, кДж/кг; t_b – температура воздуха, °C; C_b – теплоёмкость воздуха, кДж/(кг·°C).

Действительная температура горения топлива в топках всегда меньше теоретической из-за потерь теплоты в окружающую среду, передачи части теплоты экранным поверхностям нагрева, подсоса холодного воздуха в топку и другим причинам.

С учётом пирометрического коэффициента $\eta = 0,7-0,8$ действительную температуру горения можно рассчитать по приближённой формуле

$$t_d = t_a \eta, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7.5)$$

В табл. 7.2 приведена теплота сгорания корьевых отходов в зависимости от влажности и температуры дутьевого воздуха.

Анализ табл. 7.2 показывает, что устойчивое горение корьевых отходов с влажностью 55-60 % может быть достигнуто при нагревании воздуха до 400 °C и выше. Снижение теоретической температуры горения коры с увеличением влажности обусловлено понижением теплоты сгорания топлива, потерями теплоты в окружа-

ющую среду, теплообменом горящего слоя с парообразующими поверхностями нагрева и другими факторами.

Таблица 7.2

Адиабатическая температура горения коры в зависимости от влажности коры и температуры дутьевого воздуха

Влажность коры, %	0	20	40	60	80
Температура воздуха, °С:					
$t_b = 0$	1875,0	1779,4	1517,8	1161	452,0
$t_b = 400$	1991,7	1959,3	1677,3	1310	551,1

7.2. Подготовка корьевых и древесных отходов к сжиганию

На рис.7.1 показана схема подготовки корьевых отходов к сжиганию в топках котельных установок, состоящая из окорочного барабана, магнитных сепараторов для улавливания металлических включений, цепного пресса, корорубки для фракционирования коры и специального предтопка. В схему подготовки может быть также включена сушильная установка для снижения влажности топлива.

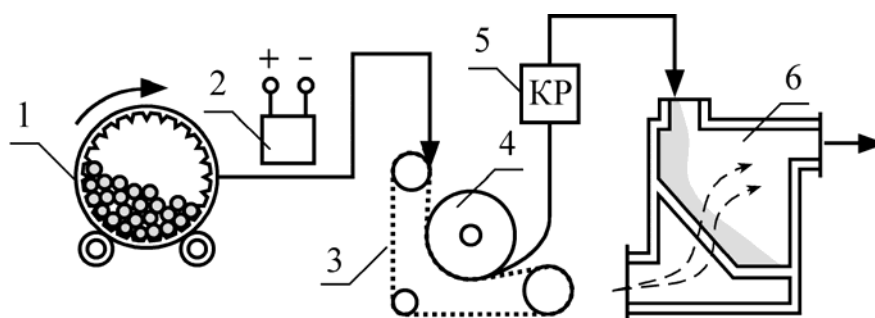


Рис. 7.1. Технологическая схема подготовки корьевых отходов к сжиганию:

1 – коробдирочный барабан; 2 – магнитный сепаратор;
3 – пластинчатая прижимная цепь; 4 – барабан цепного пресса; 5 – корорубка; 6 – топка для сжигания корьевых отходов

Коробдирочная установка предназначена для окорки хвойных и лиственных пород древесины. Она состоит из барабана диаметром до 3,8 м и длиной до 27 м, на внутренней поверхности которой

имеются окорочные балки. На корпусе барабана смонтированы опорные бандаж и зубчатые венцы, а также имеются профилированные отверстия для выгрузки коры.

В полость барабана подаётся вода для замачивания древесины с температурой 40-80 °С и для её промывки при выгрузке из барабана с температурой 5-18 °С. Объёмная производительность окорочных барабанов составляет 50-120 м³/ч.

Корорубка предназначена для грубого измельчения отходов древесины хвойных и лиственных пород, содержащих до 20 % мелких и крупных отщепов с целью подготовки их для сжигания. Ножевая корорубка с вертикальным ротором состоит из воронки, корпуса, контрножей, двигателя и рамы. Режущим органом корорубки являются четыре ножа, установленные на роторе. Кора загружается в воронку, а затем попадает на вращающиеся ножи и измельчается. В измельчённой коре допускаются куски древесины размером до 50 мм.

Снижение влажности корьевых отходов производится в прессах, которые представляют собой устройства статического действия для создания давления и удаления влаги из коры механическим способом. Прессование является наиболее экономичным способом удаления воды из влажных материалов.

Винтовой короотжимный пресс состоит из корпуса, винта для перемещения коры и создания давления и гидравлической системы для регулирования работы пресса. Отжатая влага удаляется из пресса через отверстия, имеющиеся в корпусе, и полый вал. Испытания винтовых прессов показали, что влажность коры в прессе уменьшается от 85,7 % до 56,7 %, а расход электроэнергии составляет 6,5-17 кВт на одну тонну отжатой коры. Полученная конечная влажность коры достаточна для организации устойчивого горения в топочных камерах котельных установок без применения подсветки сжиганием мазута или газа.

Плунжерные (поршневые) прессы циклического действия. Они состоят из корпуса, прессующего плунжера, совершающего возвратно-поступательные движения; отжимной плиты, которая изменяет размеры выходного сечения для коры и гидравлической системы, управляющей работой плунжера и прижимной плиты. Цикл работы пресса состоит из загрузки определённой порции коры, её сжатия за счёт перемещения плунжера, отжима путём сжатия порции коры. Затем следует выталкивание отпрессованной порции коры, опускание прессующей плиты и отвод плунжера в исходное положение. После этого цикл начинается сначала. Испытания такого

класса корьевых прессов показали их высокую производительность, надёжную работу и низкую конечную влажность коры (до 55 %).

Цепной короотжимной пресс состоит из барабана, цепного транспортёра, с помощью которого прижимается слой коры к поверхности барабана, трёх вспомогательных гидравлических прессов для создания дополнительного давления на кору и привода. Влажная кора поступает сначала в приёмный бункер, а затем в зазор между барабаном и цепным транспортёром. Под действием давления, создаваемого цепным транспортёром и гидравлическими прессами, кора частично освобождается от влаги. В зависимости от фракционного состава, толщины слоя и начальной влажности устанавливается скорость перемещения цепного транспортёра для получения необходимой конечной влажности коры. Эксплуатация короотжимных прессов такой конструкции показывает хорошие результаты в отношении обезвоживания, надёжности работы, потребления небольшого количества энергии, однако из-за низкой культуры обслуживания оборудования попадание инородных включений (металл, камни, чурки) выводит из строя цепной транспортёр. По этой причине эксплуатационный персонал в целях сохранения прессового оборудования направляет на ТЭЦ кору с более высокой влажностью, из-за чего снижается эффективность применения корьевых отходов в качестве вторичного топлива, затрудняется перемещение коры в бункерах и течках.

7.3. *Топочные устройства для сжигания корьевых и древесных отходов*

В современных топочных устройствах влажные корьевые и древесные отходы сжигаются в неподвижном или кипящем слое. Особенность сжигания в неподвижном слое заключается в том, что топливо определённой толщины слоя располагается на колосниковой решётке и перемещается под действием гравитационных сил по мере его выгорания или с помощью движущейся беспровальной цепной колосниковой решётки. Воздух, необходимый для горения, подаётся под решётку и фильтруется через слой топлива. Скорость горения при этом прямо пропорциональна скорости фильтрации воздуха сквозь слой топлива.

Простейшим топочным устройством для сжигания корьевых отходов является шахтный предтопок с наклонной неподвижной колосниковой и горизонтальной дожигательной решётками, изобра-

жёнными на рис. 7.2. Колосники крепятся на трубах фронтального экрана или массивных чугунных балках.

Влажная кора подаётся из бункера в загрузочное устройство и на колосниковом полотне располагается слоем толщиной 300-400 мм. По мере выгорания кора перемещается по наклонным колосникам, а затем на дожигательную решётку. Зола и шлак удаляются вручную. Образовавшиеся высокотемпературные продукты сгорания направляются в котел. Дутьевой воздух с температурой 150-200 °С по нескольким воздуховодам подаётся под колосниковую решётку.

Предтопками такой конструкции оборудуются котельные установки паропроизводительностью до 30 т/ч при давлении пара 4 МПа и температуре перегретого пара 450 °С. Опыт эксплуатации таких топочных устройств показывает, что устойчиво сжигать в них корьевые отходы можно при влажности до 55 %. С повышением влажности коры необходимо включать мазутные или газовые горелки. Потери теплоты с механическим недожогом практически отсутствуют, с химическим недожогом составляют 1-1,2 %, КПД котла (брутто) равен 73-75 % .

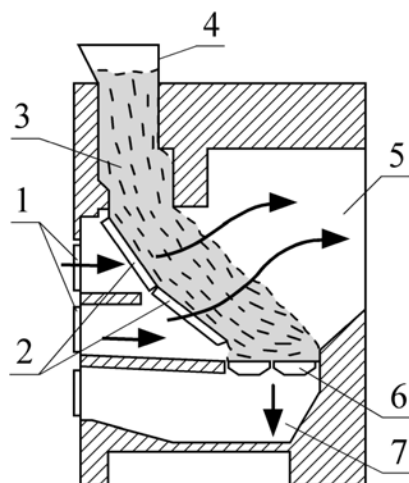


Рис. 7.2. Схема топki с наклонной колосниковой неподвижной решеткой для сжигания корьевых отходов:

1 – подвод дутьевого воздуха; 2 – наклонная неподвижная колосниковая решетка; 3 – слой топлива; 4 – топливный бункер; 5 – отвод продуктов сгорания; 6 – горизонтальная колосниковая решетка; 7 – канал гидрозолоудаления

На предприятиях ЦБП для сжигания корьевых и древесных отходов широкое распространение получили котельные агрегаты типа КМ-75-40, оборудованные предтопками с наклонной неподвижной и

горизонтальной движущейся беспровальной цепной решётками, разработанные ЦКТИ им. И.И. Ползунова (рис. 7.3). На верхней части наклонной, под углом 60° , неподвижной решётки размером 2000×6000 мм происходит подготовка корьевых отходов (подсушка и нагревание), а на нижней неподвижной части решётки размером 40000×6000 мм, расположенной под углом 45° , осуществляется горение топлива. На горизонтальной подвижной решётке дожигается коксовый остаток. Такая компоновка решётки обусловлена свойствами коры и древесных отходов, которые перемещаются под действием гравитационных сил.

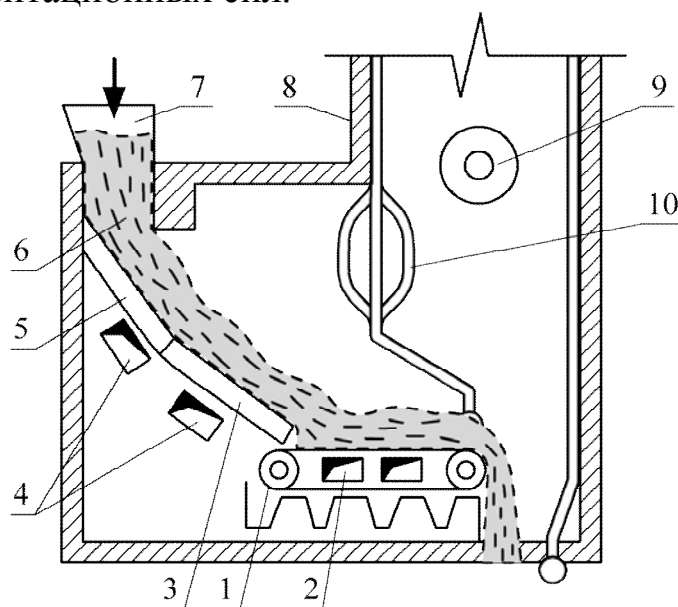


Рис. 7.3. Схема топki ЦКТИ им. И.И. Ползунова для котла КМ-75-40:

- 1 – беспровальная цепная решетка; 2 – дутьевой воздух;
- 3 – вторая часть наклонной колосниковой решетки;
- 4 – дутьевой воздух под наклонную колосниковую решетку;
- 5 – первая часть наклонной неподвижной колосниковой решетки; 6 – слой топлива; 7 – топливный бункер;
- 8 – основная топка; 9 – вспомогательная горелка; 10 – фестон

Под наклонные неподвижные решётки дутьевой воздух подаётся с температурой $350-400^\circ\text{C}$ в целях интенсивного прогрева и испарения влаги, а под горизонтальную – с температурой $200-250^\circ\text{C}$ для дожигания коксового остатка.

Предтопок и основная топка котельного агрегата разделены между собой трубами фронтального экрана, на которых имеется газовая перегородка для предотвращения пережога горизонтальной части решётки от излучения при включении вспомогательных горелок, расположенных на боковых стенах основной топочной камеры. В

верхней части предтопка фронтальной экран фестонообразен для прохода продуктов сгорания из предтопка в основную топочную камеру.

На рис. 7.4 приведена схема топки с кипящим слоем, состоящая из теплоизолированной топочной камеры, воздухораспределительной решётки, загрузочных и разгрузочных устройств, вспомогательной растопочной горелки.

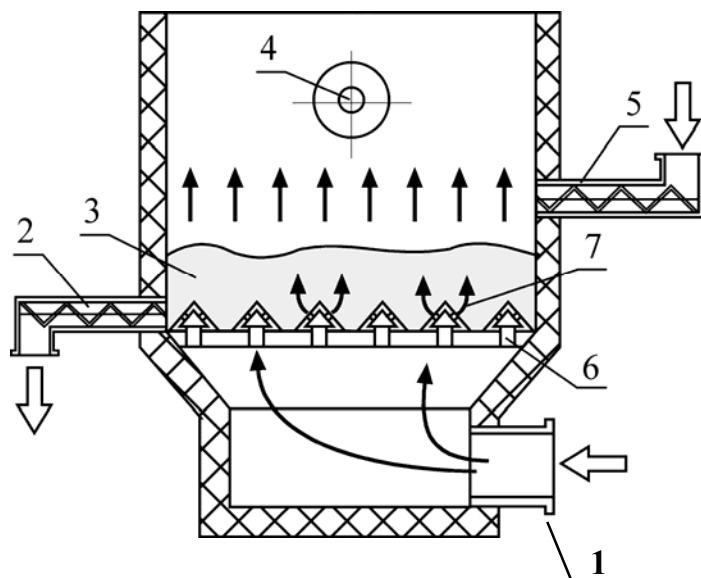


Рис. 7.4. Схема топки с кипящим слоем для сжигания корьевых отходов:

- 1 – подвод дутьевого воздуха; 2 – выгрузка из топки золы и отработавшего песка; 3 – кипящий (псевдоожиженный) слой;
- 4 – растопочная горелка; 5 – загрузка слоя топливом и свежим песком; 6 – прямые каналы в распределительной решетке;
- 7 – подвод воздуха через колокольчики

Кипящий (псевдоожиженный) слой – это двухфазная псевдогомогенная система, состоящая из твёрдых частиц и газа. Слой напоминает кипящую жидкость, а его поведение подчиняется законам гидростатики. В топочной камере кипящий слой образуется из слоя инертного материала, чаще всего из кварцевого песка, и сжигаемого топлива. Инертный материал служит для стабилизации процесса горения топлива за счёт большого количества аккумулированной теплоты слоем песка.

Воздухораспределительная решётка выполняется из огнеупорного материала и имеет вертикальные отверстия и колпачки с отверстиями, расположенные под углом. Вертикальные отверстия имеют диаметр больше, чем наклонные, через которые подаётся основное количество воздуха, струи которого удерживают частицы во

взвешенном состоянии и создают псевдоожиженный слой. Наклонные струи, вытекающие из колпачков, способствуют горизонтальному перемещению частиц топлива и кварцевого песка, образуя сложные траектории их движения, в результате чего твёрдые частицы находятся в непрерывном хаотическом движении, и достигаются высокие коэффициенты тепло- и массообмена и, соответственно, скорости нагревания топлива, испарения влаги и горения.

В топочной камере имеются загрузочные устройства для топлива и кварцевого песка, а также разгрузочное устройство для песка. Имеется вспомогательная горелка для сжигания мазута или газа для пуска топки в работу, а также для подсветки кипящего слоя в случае значительного снижения температуры горения топлива.

Высокая скорость горения топлива в кипящем слое обусловлена высокой интенсивностью процессов тепломассообмена за счет того, что вся поверхность частицы топлива во время «кипения» участвует в процессах подготовки и горения в отличие от неподвижного слоя топлива.

Однако, топки с кипящим слоем имеют следующие недостатки:

- к корьевым отходам предъявляются высокие требования в отношении равномерности фракционного состава и постоянства влажности;
- в топочной камере требуется устанавливать дополнительные устройства для ввода и вывода инертного материала;
- необходимо предусматривать растопочные горелки, работающие на газообразном или жидком топливе;
- в связи с большим уносом мелкой фракции в газоходы котельного агрегата возникает необходимость в системе возврата уноса.

Модификацией предтопка с кипящим слоем является схема с предварительной газификацией корьевых и древесных отходов в специальной топочной камере, изображенной на рис. 7.5. Отличительной особенностью такой схемы сжигания в кипящем слое является наличие самостоятельной топочной камеры, в нижнюю часть которой через распределительную решетку подается воздух с температурой 150-160 °С. Коэффициент избытка воздуха в топке поддерживается в пределах от 0,5 до 0,6. Недостаток воздуха для полного сгорания топлива и высокая температура горения способствуют термическому разложению органической части топлива с образованием H_2 , CO , C_mH_n , которые наряду с образующимися коксовыми частицами должны дожигаться в основной топочной камере, целесообразнее всего, по схеме низкотемпературного вихря.

Вторым и, очевидно, основным направлением повышения эффективности кипящего слоя с газификацией топлива является улавливание несгоревших коксовых частиц и возврат их в топочную камеру для дожигания.

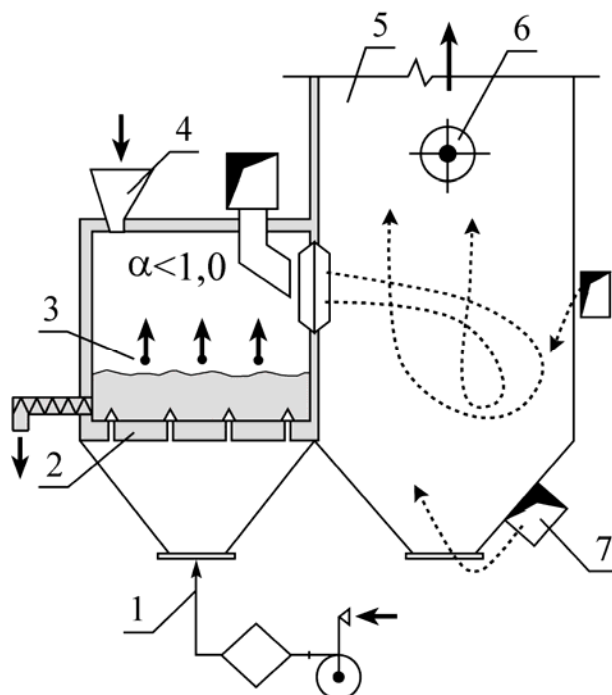


Рис. 7.5. Схема предтопка с предварительной газификацией для сжигания корьевых отходов:

- 1 – дутьевой воздух; 2 – воздухораспределительная решетка;
- 3 – коксовые частицы; 4 – загрузка топлива и песка; 5 – основная топка котла; 6 – горелка; 7 – вторичный воздух

Наряду с топками кипящего слоя в зарубежных странах (США, Канада и др.) для сжигания корьевых и древесных отходов широкое распространение получили топки с наклонно-переталкивающими колосниковыми решётками, схема которой показана на рис. 7.6. Колосниковое полотно состоит из четырёх групп. В первой группе (на начальном участке движения топлива) установлены две группы неподвижных колосников с разным углом наклона к горизонту (соответственно 50° и 37°), а последующие три группы имеют чередующиеся подвижные и неподвижные колосники. Подвижные колосники совершают возвратно-поступательное движение, величина хода их составляет 0,15 м. За счёт установки решётки под углом и профилированной поверхности колосников частицы топлива перемещаются по решётке, совершая сложную траекторию движения,

перемешиваясь между собой. Подвижные колосники или их группы соединены со специальными гидравлическими приводами, обеспечивающими их возвратно-поступательное движение.

Предварительная подготовка корьевых и древесных отходов к сжиганию (сушка) осуществляется на неподвижной части колосниковой решётки, под которую подаётся сушильный агент (воздух) с помощью труб диаметром 57 мм, расположенных в отверстиях плит. Далее по ходу топлива располагается первая секция неподвижной колосниковой решетки размером 2,3-2,95 м, расположенная под углом 16° к горизонту. Аналогичная вторая секция расположена уступом вниз. Каждая секция состоит из пяти рядов колосников (двух подвижных и трёх неподвижных). В конце топки имеется шлаковый комод, на днище которого установлена решётка подвижных колосников.

Дутьевой воздух после воздухоподогревателя с температурой $150-170^\circ\text{C}$ подаётся под подвижные части решётки.

Наклонно-переталкивающие колосниковые решётки имеют следующие недостатки:

- наличие сервомоторов и гидростанций усложняет эксплуатацию котельных агрегатов;
- происходит забивание дутьевых отверстий при наличии в составе топлива мелкой фракции.

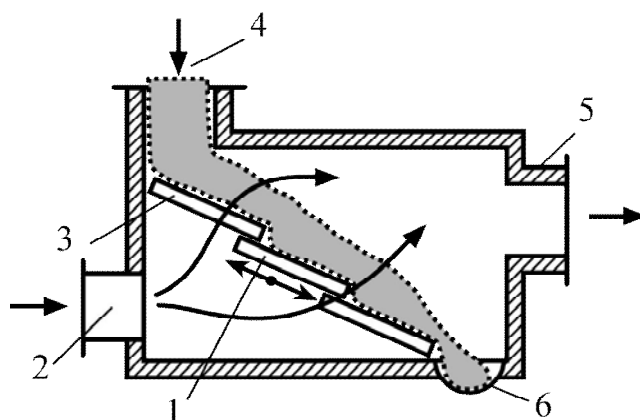


Рис. 7.6. Схема топки для сжигания корьевых отходов с подвижными колосниками:

- 1 – подвижные колосники; 2 – дутьевой воздух;
3 – неподвижные наклонные колосники; 4 – топливный бункер; 5 – отвод продуктов сгорания в котел; 6 – канал гидрозолоудаления

Для стабилизации горения влажных корьевых отходов и повышения тепловыделения в топочной камере дутьевой воздух нагревают до температуры 400-450 °С, тем самым повышая расчетную теплоту сгорания коры. Однако, как следует из графика (рис. 7.7), расчетная теплота сгорания увеличивается незначительно (кривая 2) и, кроме того, уменьшается КПД котельного агрегата.

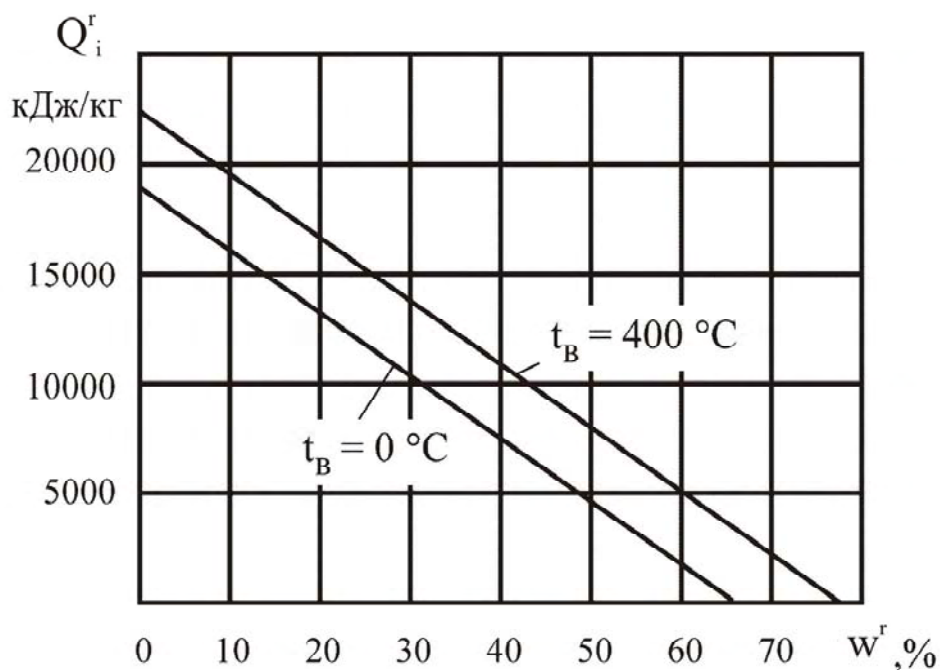


Рис. 7.7. График зависимости низшей теплоты сгорания Q_i^r от влажности корьевых отходов:

$$Q_i^r = f(w) \text{ при температуре дутьевого воздуха } t_B = 0^\circ\text{C};$$

$$Q_i^r = f(w) \text{ при температуре дутьевого воздуха } t_B = 400^\circ\text{C}$$

В промышленной энергетике применяются топки В.В. Померанцева (рис. 7.8), основанные на принципе скоростного горения древесной щепы и корьевых отходов за счет повышенной скорости фильтрации воздуха сквозь слой топлива, так как известно, что скорость горения топлива в слое прямо пропорциональна скорости обтекания воздухом частиц топлива.

Скоростная топка состоит из шахты, в нижней части которой располагается зажимная решетка в виде ошипованных экранных труб для удержания топлива от выноса в газоходы котельного агрегата. В таких топках напряжение зеркала горения на 15-20 % выше по сравнению со слоевым сжиганием топлива.

Основным недостатком таких топочных устройств является неравномерное распределение воздуха по фронту топки за счет образования при горении топлива кратеров, в которые устремляется основной поток воздуха, при этом создаются высокие скорости продуктов сгорания, соответствующие выносу коксовых частиц в газоходы котельного агрегата и в окружающую среду.

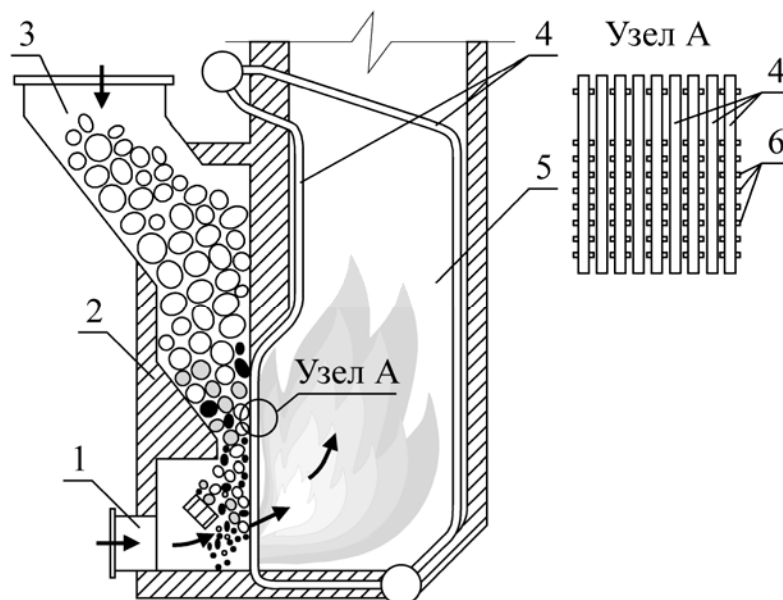


Рис. 7.8. Схема скоростной топки В.В. Померанцева для сжигания корьевых отходов:

1 – дутьевой воздух; 2 – направляющий фартук;
3 – топливный бункер; 4 – экранные трубы; 5 – основная топка; 6 – шипы

Эффективность работы слоевого топочного устройства определяется видимым тепловым напряжением колосниковой решетки, которое представляет собой отношение тепловыделения в топке к площади колосниковой решетки

$$q_R = \frac{B_T Q_i^r}{R}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (7.6)$$

а также видимым тепловым напряжением зеркала горения

$$q_F = \frac{B_T Q_i^r}{F}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (7.7)$$

где B_T – расход топлива, кг/ч; Q_i^r – низшая теплота сгорания коры, кДж/кг; R – активная площадь колосниковой решетки, м^2 ; F – активная площадь зеркала горения, м^2 .

Для корьевых топок $q_R = 4600 \cdot 10^3$ кДж/(м²·ч); при сжигании щепы $q_R = 3352 \cdot 10^3$ кДж/(м²·ч); для топок с кипящим слоем $q_R = (10-12) \cdot 10^6$ кДж/(м²·ч).

Другим показателем эффективности работы топок является видимое тепловое напряжение топочного объема, представляющее отношение тепловыделения к объему топки

$$q_v = \frac{B_T Q_i^r}{V_T}, \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{ч)}, \quad (7.8)$$

где V_T – объем топочного устройства, м³.

Для корьевых топок $q_v = (1050-1250) \cdot 10^3$ кДж/(м³·ч), а для кипящего слоя $q_v = (1,4-1,5) \cdot 10^6$ кДж/(м³·ч).

7.4. Уравнение теплового баланса топок для сжигания корьевых и древесных отходов

Уравнение теплового баланса топочных устройств для сжигания корьевых и древесных отходов, как и для других топок, имеет следующий вид

$$Q_i^r + Q_{фв} + Q_{фг} = Q_T + Q_{хм} + Q_{окр}, \text{ кДж/кг}. \quad (7.9)$$

Левая часть уравнения (7.9) представляет собой приходные статьи теплового баланса, а правая – расходные статьи.

Приходные статьи теплового баланса включают:

- низшую теплоту сгорания корьевых и древесных отходов, Q_i^r , кДж/кг;
- физическую теплоту дутьевого воздуха

$$Q_{фв} = \alpha_T V_B^0 C_B t_B = \alpha_T I_B^0, \text{ кДж/кг}, \quad (7.10)$$

где α_T – коэффициент избытка воздуха в топочной камере; $\alpha_T = 1,1-1,2$; V_B^0 – теоретический расход воздуха для горения корьевых и древесных отходов, м³/кг; C_B – теплоёмкость воздуха, $C_B = 1,0$ кДж/(кг·°С); t_B – температура дутьевого воздуха, °С; I_B^0 – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг;

- физическую теплоту корьевых и древесных отходов

$$Q_{фг} = C_T t_T = i_T, \text{ кДж/кг}, \quad (7.11)$$

где C_T – теплоёмкость топлива, кДж/(кг·°C); t_T – температура топлива, °C; i_T – энтальпия топлива, кДж/кг.

Расходная часть уравнения теплового баланса включает в себя следующие статьи:

- *теплоту образовавшихся продуктов сгорания*, являющуюся полезной теплотой, вырабатываемой топкой

$$Q_T = (I_T - \alpha_T I_{хв}) (100 - q_x - q_m) , \text{ кДж/кг} , \quad (7.12)$$

где I_T – энтальпия образовавшихся продуктов сгорания корьевых отходов в топке котла, $I_T = \rho_T V_T^0 C_T t_T$, кДж/кг; C_T – средняя теплоёмкость продуктов сгорания корьевых отходов, кДж/(кг·°C); t_T – температура уходящих газов из топочной камеры, °C; V_T^0 – теоретический объём газов, образовавшихся при горении топлива, м³/кг; α_T – коэффициент избытка воздуха в топочной камере; $I_{хв}$ – энтальпия холодного воздуха, $I_{хв} = V_B^0 C_B t_B$, кДж/кг; q_x – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, $q_x = 1-2 \%$; q_m – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, для дров $q_m + q_x = 1-3 \%$;

- *потери теплоты в окружающую среду*

$$Q_{окр} = \frac{F k \Delta t}{B_T} , \text{ кДж/кг} , \quad (7.13)$$

где F – площадь поверхности топочной камеры, м²; k – коэффициент теплопередачи, $k = 60-80$ кДж/(м²·ч·°C); Δt – температурный напор, °C.

На основании уравнения теплового баланса определяется тепловыделение в топочной камере, которое равно

$$Q_T = (Q_i^r + Q_{фв} + Q_{фг}) - (Q_x + Q_m + Q_{окр}) , \text{ кДж/кг} . \quad (7.14)$$

Тепловыделение в топочной камере Q_T является полезной теплотой, которая в котле затрачивается для получения пара или горячей воды. По полезному тепловыделению также рассчитывается температура горения топлива в топочной камере.

Коэффициент полезного действия предтопка определяется как отношение полезного тепловыделения Q_T ко всем затратам в топке, выраженное в процентах:

$$\eta_t = \frac{Q_t}{Q_t + Q_x + Q_m + Q_{окр}} \cdot 100\% . \quad (7.15)$$

На рис. 7.9 приведена схема доставки, подготовки и сжигания древесных отходов. Древесная щепа автотранспортом доставляется с лесопункта, где она размельчается на рубительных машинах. Из бункеров шнековыми питателями пересыпается на скребковый транспортер и далее подается на колосниковую решетку котельной установки.

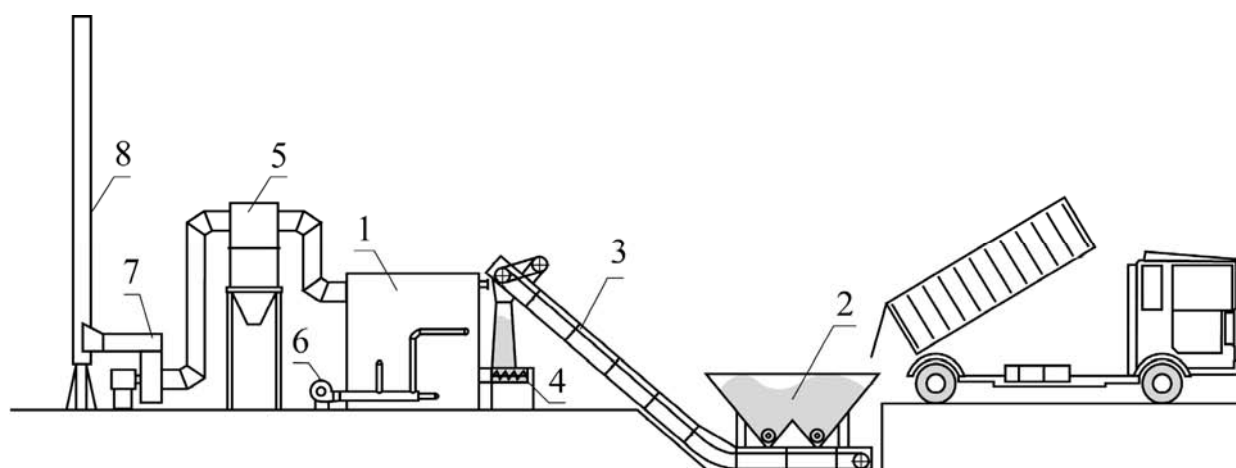


Рис. 7.9. Схема доставки, подготовки и сжигания древесных отходов:
1 – котельный агрегат; 2 – склад топлива; 3 – скребковый транспортер; 4 – загрузочный транспортер;
5 – мультициклон; 6 – вентилятор; 7 – дымосос; 8 – дымовая труба

Образовавшиеся продукты сгорания подвергаются очистке в батарейном циклоне или скруббере и дымососом перекачиваются в дымовую трубу.

Что же касается загрязнения окружающей среды, то по сравнению с другими видами натурального топлива при сжигании древесины выделяется меньше всего вредных веществ. Кроме того, за время своего жизненного цикла хвойные и лиственные породы древесины выделяют гораздо больше кислорода, чем поглощают при их сжигании.

Библиографический список

Арутюнов В.А., Миткалинный В.Н., Старк С.Б. Металлургическая теплотехника. Т. 1. -М.: Metallurgiya, 1974.

Баскаков А.П., Луначевский Б.П. и др. / под ред. И.П. Мухленова. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник. -Л.: Химия, 1986.

Бельский А.П. Использование вторичных топливных ресурсов в целлюлозно-бумажном производстве/ ЛТИ ЦБП. Л., 1982.

Бельский А.П. Проектирование и эксплуатация тепломассообменных (сушильных) установок/ СПб ТИ ЦБП. СПб., 1992.

Бельский А.П., Ганичев В.А. Спецвопросы тепломассообмена: программа и методические указания к выполнению контрольных работ/ ЛТИ ЦБП. Л., 1990.

Бельский А.П., Лотвинов М.Д. Вентиляция бумагоделательных машин. -М.: Лесная промышленность, 1983.

Ененко Г.М., Старков Е.М., Филимонов Ю.П. Промышленные печи. -М.: Машиностроение, 1964.

Ершов Ю.Г., Санников В.А. Конденсатное хозяйство целлюлозно-бумажных предприятий. -М.: Лесная промышленность, 1989.

Жучков П.А. Огнетехнические установки в ЦБП: учебное пособие/ ЛТИ ЦБП. Л., 1978.

Жучков П.А. Расчет и проектирование высокотемпературных установок ЦБП/ ЛТА. Л., 1979.

Жучков П.А. Спецвопросы тепломассообмена в энерготехнологических процессах и установках целлюлозно-бумажного производства/ ЛТА. Л., 1986.

Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. -М.: Лесная промышленность, 1978.

Жучков П.А. Тепломассообмен в процессах сушки и горения. Методическое пособие по спецкурсу/ ЛТА. Л., 1974.

Жучков П.А., Гофлин А.П., Саунин В.И. Теплотехника целлюлозно-бумажного производства. -М.: Экология, 1991.

Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет. -М.: Машиностроение, 1964.

Кишко А.В., Ванчаков М.В. Системы и оборудование для переработки отходов древесины: учебное пособие/ СПб ГТУ РП. СПб., 1999.

Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая конструкция печей черной металлургии. -М.: Metallurgiya, 1989.

Лакомкин В.Ю., Бельский А.П. Расчет и проектирование барабанной сушильной установки: методические указания/ СПб ГТУ РП. СПб., 1994.

Лебедев П.Д., Щукин А.А. Промышленная теплотехника. -М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956.

Липовков И.З. Содорегенерационные котлоагрегаты. -М.: Лесная промышленность, 1977.

Монастырев А.В., Александров А.В. Печи для производства извести. Справочник. -М.: Metallurgia, 1979.

Непенин К.Н. Производство сульфитной целлюлозы. Т.1. -М.: Лесная промышленность, 1976.

Непенин К.Н. Производство сульфатной целлюлозы. Т.2. -М.: Лесная промышленность, 1990.

Новикова А.И. Щелочная варка целлюлозы: учебное пособие/ СПб ГТУ РП. СПб., 1994.

Поляков Ю.А., Бельский А.П., Лаптев В.Н. Древесно-массное производство: учебное пособие/ ЛТИ ЦБП, ЛТА. Л., 1989.

Санников В.А. Вторичные энергетические ресурсы целлюлозно-бумажной промышленности. -М.: Лесная промышленность, 1983.

Филимонов Н.П., Старк С.Б., Морозов В.А. Metallургическая теплотехника. Т.2. -М.: Metallurgia, 1979.

Содержание

Введение	3
1. Основные направления энергосбережения в энергетических и технологических установках	5
1.1. Способы экономии топливно-энергетических ресурсов	-
1.2. Оценка энергосбережения в теплотехнологических процессах и установках	9
1.3. Энергосбережение в теплотехнологических установках целлюлозно-бумажных предприятий	15
2. Энергосбережение в промышленных печах	19
2.1. Классификация печных установок	-
2.2. Доменные печи	20
2.3. Методические печи	31
2.4. Известеобжигательные печи	41
2.5. Туннельные печи	45
2.6. Электрические печи	52
3. Энерготехнологическое использование топлива	57
3.1. Термическая переработка твердого топлива	-
3.2. Материальный баланс газогенератора	67
4. Энергосбережение за счет сжигания черных сульфатных щелоков	73
4.1. Схема производства сульфатной целлюлозы	-
4.2. Свойства черного сульфатного щелока	77
4.3. Содорегенерационные котельные агрегаты (СРК)	79
4.4. Тепловой баланс содорегенерационного котельного агрегата	85
5. Энергосбережение при снижении температуры уходящих газов	91
5.1. Котлы-утилизаторы	-
5.2. «Глубокое» охлаждение уходящих газов	94
5.3. Утилизация теплоты уходящих газов в контактном теплообменнике с активированными насадками (КТАН) и высокотемпературном подогревателе	98
6. Энергосбережение при сжигании органических отходов целлюлозно- бумажного производства	101
6.1. Элементный состав и теплота сгорания органических отходов	-
6.2. Энергосбережение при сжигании лигнина	103
6.3. Энергосбережение при сжигании биологического ила	107
6.4. Энергосбережение при сжигании серы	113
6.5. Энергосбережение при сжигании сульфитных щелоков на магниево-основании	114
7. Энергетическое использование корьевых и древесных отходов	116
7.1. Состав и теплота сгорания коры и древесных отходов	-
7.2. Подготовка корьевых и древесных отходов к сжиганию	120
7.3. Топочные устройства для сжигания корьевых и древесных отходов	122
7.4. Уравнение теплового баланса топок для сжигания корьевых и древесных отходов	131
Библиографический список	134