

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. А. Вальченко

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

ПОСОБИЕ

**по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2008

УДК 66.046+66.021.4(075.8)
ББК 31.391я73
В16

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 22.05.2006 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Т. В. Алферова

Вальченко, Н. А.
В16 Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки : пособие по
одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» / Н. А. Вальченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 39 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-686-8.

Рассмотрены энергетические и теплотехнологические основы высокотемпературной теплотехнологии.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика».

**УДК 66.046+66.021.4(075.8)
ББК 31.391я73**

ISBN 978-985-420-686-8

© Вальченко Н. А., 2008
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2008

Введение

Современные печи представляют собой достаточно сложные агрегаты, служащие для нагрева и термической обработки разных материалов. Промышленное производство с его разнообразной и сложной технологией предъявляет серьезные требования к работе и организации температурного режима печного оборудования, в частности к составлению и ведению режима тепловой обработки. Чтобы удовлетворить требованиям технологического и теплового характера, приходится разрабатывать многозонный режим нагрева, что в конечном итоге усложняет конструкцию печи и ее обслуживание. Сложность конструкции и обслуживания несомненно находит отражение в вопросах экономики нагрева. Это требует четкого представления о взаимной связи технологической и теплотехнической сторон рассматриваемого вопроса о нагреве. В итоге все сводится к выполнению детального теплового расчета, который сопряжен с проработкой отдельных вариантов и последующим выбором оптимального решения. Результаты теплового расчета позволяют оценить реальность принятого варианта процесса тепловой обработки металла в соответствии с заданной технологией, а также его экономическую эффективность.

Нагрев изделий произвольной формы – сложный физический процесс. Причем характер температурного поля нагретого в печи тела определяет процесс формирования свойств при последующей обработке металла. Умение рассчитывать распределение температуры заготовки или изделия необходимо при разработке конкретного технологического процесса.

Целью изучения курса является формирование специальных знаний по проектированию, эксплуатации и исследованию высокотемпературных теплотехнических установок – одной из наиболее емких потребителей топлива и других энергоресурсов (электроэнергии, кислорода, сжатого воздуха) в промышленности.

1. Теплотехническая классификация высокотемпературных теплотехнологических процессов

Классификационное многообразие высокотемпературных теплотехнологических процессов может быть существенно сокращено, если в основу их классификации положить управляемые теплотехническими средствами физические или физико-химические явления, лимитирующие длительность рабочего цикла и производительность теплотехнологической установки. При этом можно выделить следующие виды теплотехнологических процессов:

1. Теплотехнологические процессы, определяемые (лимитируемые) интенсивностью подвода теплоты к поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего теплообмена). К числу таких технологических процессов относятся многочисленные виды нагрева изделий при числах Био, значительно меньше 1,0.

2. Теплотехнологические процессы, определяемые интенсивностью подвода массы извне к реагирующей поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью конвективного массообмена), например, некоторые окислительные и восстановительные процессы обжига или плавки.

3. Теплотехнологические процессы, определяемые интенсивностью переноса теплоты внутри обрабатываемого материала (интенсивностью внутреннего теплопереноса). К числу таких технологических процессов относятся, например, многочисленные виды нагрева изделий при числах Био, значительно превышающих 1,0.

4. Теплотехнологические процессы, определяемые интенсивностью молекулярного переноса массы внутри обрабатываемого материала, например, процессы, связанные с обработкой многокомпонентных исходных материалов и отличающиеся повышенными требованиями к гомогенности получаемого конечного продукта.

5. Теплотехнологические процессы, определяемые интенсивностью перемешивания фаз (твердых, жидких) в зоне их термической обработки, например, термические способы физико-термической обработки многокомпонентных материалов в пересыпающемся слое.

6. Теплотехнологические процессы, определяемые скоростью собственного химического реагирования.

7. Теплотехнологические процессы, определяемые скоростью разделения целевых и сопутствующих продуктов, например, плавка медных руд или концентратов на штейн в скоростных печах.

8. Теплотехнологические процессы, определяемые совокупностью двух или более из вышеперечисленных факторов.

Данная классификация теплотехнологических процессов позволяет уже на первой стадии исследования теплотехнических принципов их организации абстрагироваться от многих конкретных особенностей, концентрируя внимание на главном, помогая определять наиболее рациональные теплотехнические и конструктивные схемы оформления, применимые для групп технологических процессов. Такая классификация позволяет рассматривать целые классы технологических процессов с единых позиций и едиными методами, облегчает заимствование наиболее существенных результатов исследований одних видов технологических процессов для организации других путем использования физических и математических аналогий. Так, например, результаты исследования средств и путей интенсификации внешнего и внутреннего теплообмена могут быть использованы для организации процессов соответственно внутреннего и внешнего массообмена.

При такой классификации облегчается также заимствование теплотехнических схем оформления одних технологических процессов для оформления других. Создаются более благоприятные условия для унификации средств и способов интенсификации различных теплотехнологических процессов.

Не меньшим многообразием отличаются температурные и тепловые графики высокотемпературных теплотехнологических процессов. Поэтому обобщающая классификация этих графиков является также весьма полезной при энергетическом и теплотехническом анализе технологических процессов и установок.

Уровень расхода топлива в теплотехнологической установке в первую очередь определяется следующими особенностями температурного графика технологического процесса: начальной температурой исходных материалов T_M^H , средней температурой продуктов $T_M^{П.И}$, при которой они используются непосредственно после выдачи из теплотехнологического реактора (в общем случае учитываются целевые и сопутствующие продукты).

Если принять за основу классификации эти два фактора, то многообразии температурных и тепловых графиков сводится к следующим четырем группам.

Группа А включает графики технологических процессов, в которых начальная температура исходных материалов равна температуре окружающей среды ($T_M^H = T_{o.c}$), а температура $T_M^{п.и}$ равна средней максимальной температуре материала в процессе $T_M^{п.и} = \bar{T}_M^{макс}$.

Группа Б включает графики технологических процессов:

$$T_M^H = T_{o.c} \text{ и } T_M^{п.и} < \bar{T}_M^{макс} \text{ (в частном случае } T_M^{п.и} = T_{o.c}\text{)}.$$

Группа В включает графики технологических процессов:

$$T_M^H > T_{o.c} \text{ и } T_M^{п.и} = \bar{T}_M^{макс}.$$

Группа Г включает графики технологических процессов:

$$T_M^H > T_{o.c} \text{ и } T_M^{п.и} < \bar{T}_M^{макс} \text{ (в частном случае } T_M^{п.и} = T_{o.c}\text{)}.$$

В каждой из указанных групп можно выделить несколько подгрупп, отличающихся числом ступеней (стадий) теплотехнологического процесса.

Каждая подгруппа температурных и тепловых графиков имеет два варианта: вариант «а» включает процессы, в которых эндотермические процессы или выражены весьма слабо, или отсутствуют; вариант «б» отличается тем, что он включает процессы, в которых эндотермические эффекты играют существенную роль.

На рис. 1.1 и 1.2 в качестве примера приведены температурные и тепловые графики одно-, двух- и трехступенчатых технологических процессов. По оси ординат отложены относительная средняя температура обрабатываемого в печи материала (в долях средней максимальной температуры материала в процессе).

К группе А относятся, например, процессы нагрева изделий при $Bi \ll 1,0$ (вариант 1, а); процессы нагрева изделий при $Bi \gg 1,0$ (варианты 2, а и 3, а); процессы нагрева с последующим плавлением (вариант 1, б); процессы нагрева с плавлением и последующей технологической обработкой расплава (вариант 2, б); процессы нагрева руд с плавлением, восстановление с последующей технологической дообработкой расплава (вариант 3, б).

Получаемый в этих процессах продукт используется далее (после установки) при $T_M^{п.и} = \bar{T}_M^{макс}$.

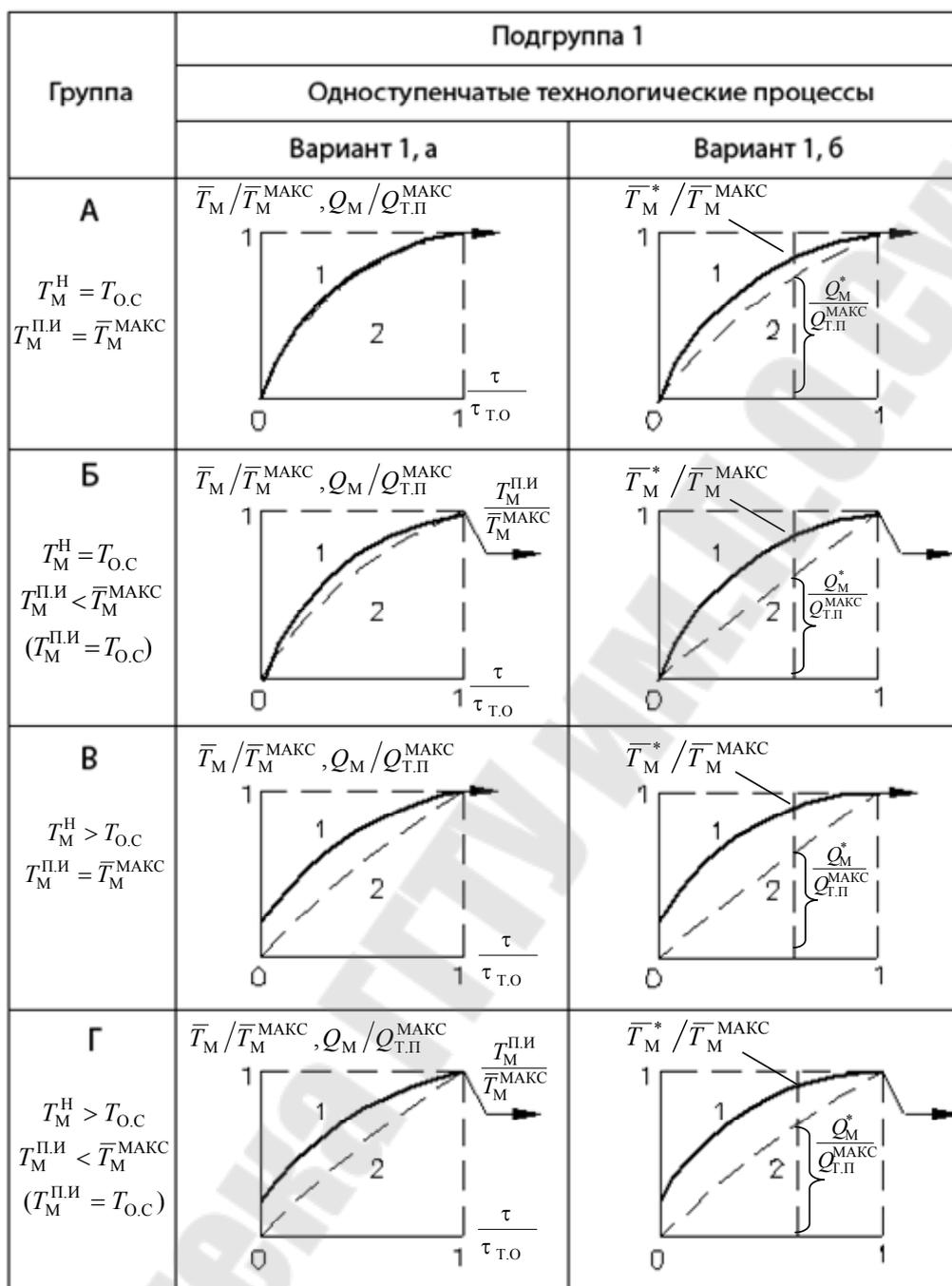


Рис. 1.1. Примеры температурных и тепловых графиков технологических процессов (группы А, Б, В, Г; подгруппа 1):

1 – относительная температура, $\bar{T}_M / \bar{T}_M^{МАКС}$; 2 – относительное теплотеплопоглощение материала, $Q_M / Q_{Т.П}^{МАКС}$ – соответственно внешнее теплотеплопоглощение материала за текущее время процесса τ и общее теплотеплопоглощение материала за время τ_0 , необходимое для доведения его средней температуры до $\bar{T}_M^{МАКС}$; Q_M^* – внешнее теплотеплопоглощение материала перед стадией процесса, при которой существенную роль играют эндотермические эффекты; T_M^* – средняя температура материала, соответствующая теплотеплопоглощению Q_M^*



Рис. 1.2. Примеры температурных и тепловых графиков технологических процессов (группа А, подгруппы 1, 2, 3):

Q_M^I, Q_M^{II} – внешнее теплопоглощение соответственно после первой и второй ступеней технологического процесса и относительное внешнее теплопоглощение этого же материала (в долях теплопоглощения материала $Q_{T.П}^{MAK}$). По оси абсцисс отложено относительное текущее время процесса (в долях полного времени тепловой обработки материала в реакторе)

К группе Б относятся, например, некоторые процессы окислительного обжига, сушки, нагрева, плавки многокомпонентных шихт с последующим технологически нерегламентированным охлаждением до $T_M^{п.и}$ (вариант 1, б); процессы термической обработки термомассивных изделий с технологически регламентированным охлаждением до $T_M^{п.и} = T_{о.с}$ и другие процессы.

К группе В относятся, например, процессы тепловой обработки и корректирования расплавов, вторичный нагрев термотонких изделий после неполного их охлаждения, используемых далее при $T_M^{п.и} = T_M^{макс}$ (вариант 1, а); нагрев термомассивных изделий при «горячем» посаде: различные двух- и трехступенчатые процессы плавки при использовании предварительно нагретых исходных материалов.

К группе Г относятся все процессы, входящие в группу Б, но проводимые в печах при начальной температуре исходных материалов $T_M^H = T_{о.с}$.

2. Классификация реакторов и источников энергии высокотемпературных теплотехнологических установок

Классификация теплотехнологических реакторов по наиболее общей особенности их конструктивного оформления приведена на рис. 2.1. Высокотемпературные теплотехнологические установки, в которых все стадии теплотехнологического процесса осуществляются в конструктивно единой камере, относят к группе установок с однокамерным реактором. Установки, в которых различные стадии теплотехнологического процесса осуществляются в конструктивно отдельных камерах, относят к теплотехнологическим установкам с многокамерным реактором. Многокамерный вариант реактора свойствен ряду новых разрабатываемых схем теплотехнологических установок.

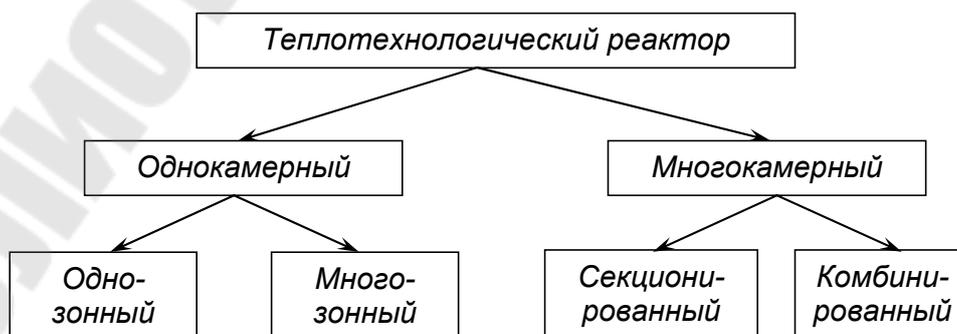


Рис. 2.1. Классификация теплотехнологических реакторов

Высокотемпературные теплотехнологические установки с однокамерным однозонным реактором характеризуются относительно равномерным температурным полем греющих газов в объеме и, как правило, циклическостью их действий. Примером таких установок являются мартеновские печи. Установки с однокамерным однозонным реактором и циклическим действием в наименьшей мере удовлетворяют современным требованиям.

Высокотемпературные теплотехнологические установки с однокамерным, но многозонным реактором отличаются непрерывностью действия и неравномерным полем температуры газов в объеме (по пути движения газов). Установки с многозонным реактором по ряду позиций более прогрессивны по сравнению с установками, имеющими однокамерный однозонный реактор.

Высокотемпературные теплотехнологические установки с многокамерным секционированным реактором характеризуются набором конструктивно однотипных камер (секций), в которых осуществляются отдельные однотипные стадии технологического процесса с применением однотипных теплотехнических принципов. В этих камерах могут использоваться автономные источники энергии. Высокотемпературные установки с многокамерным комбинированным реактором характеризуются наличием конструктивно различных отдельных камер, обычно имеющих различные источники энергии.

Многие новые разрабатываемые варианты, например, теплотехнологических установок для непрерывной выплавки стали, внедоменного получения чугуна, ориентируются на применение многокамерных реакторов. Варианты высокотемпературных теплотехнологических установок с многокамерным комбинированным реактором в общем случае открывают более широкие возможности и пути удовлетворения современных требований.

В многозонном и многокамерном реакторе можно выделить следующие зоны и камеры:

1. Зоны и камеры предварительной тепловой или тепловой и физико-химической обработки исходных материалов (ЗПТО, КПТО). Эти зоны и камеры обеспечивают начальную технологическую обработку исходных материалов в теплотехнологическом процессе, реализуемом в реакторе.

2. Зоны и камеры основной технологической обработки материалов (ЗОТО, КОТО). В этих зонах и камерах или завершается технологический процесс в целом, или проводится его решающая стадия, которой преодолевается температурный и тепловой барьер техноло-

гического процесса и создаются наиболее благоприятные условия для его завершающих стадий.

3. Зоны и камеры технологической дообработки материалов (ЗТД, КТД). Здесь полностью завершаются стадии теплотехнологической обработки материала или перед его выдачей из реактора, или перед подачей в зону (камеру) технологически регламентированного охлаждения.

4. Зоны и камеры технологически регламентированного охлаждения технологического продукта (ЗТРО, КТРО). В отличие от этих зон и камер устройства, в которых осуществляется технологически нерегламентированное охлаждение продукта, относят к теплотехническим элементам технологической установки.

Структурная схема теплотехнологического реактора показана на рис. 2.2.

К(З) ПТО	К(З) ОТО	К(З) ТД	К(З) ТРО
-------------	-------------	------------	-------------

Рис. 2.2. Структурная схема высокотемпературного теплотехнологического реактора

В установках с многозонным и нечетким конструктивным делением на зоны выделение ЗОТО может быть проведено исходя из удобства расчетного анализа и проектирования.

Часто граница ЗОТО определяется исходя из условия, что температура отходящих из этой зоны газов равна или больше конечной температуры обрабатываемого материала в этой зоне.

В высокотемпературных топливных теплотехнологических установках используется широкий набор источников энергии:

- топливо с воздушным окислением (ТВ);
- топливо с обогащенным кислородом воздухом (ТОВ);
- топливо с технологическим кислородом (ТК);
- продукты горения топлива (ПГ) от смежных огнетехнических установок (ДГ – дымовые газы, т. е. продукты практически полного сгорания топлива; НГ – продукты неполного сгорания топлива);
- комбинированные источники энергии, к числу которых относятся ТВ и ТК при их совместном использовании; ТВ (ТК) совместно с электроэнергией (ЭЭ); ТВ совместно с ПГ; другие варианты сочетаний источников энергии.

В общем случае, кроме отмеченного, в высокотемпературных теплотехнологических установках в качестве источника энергии ис-

пользуются экзотермические реакции теплотехнологических процессов, электроэнергия, солнечная энергия, высокотемпературные теплоносители атомных реакторов (в перспективе).

Схемы некоторых вариантов имеющегося и возможного размещения источников энергии, а также вариантов движения теплоносителя (дымовых газов) в камерах или зонах реакторов высокотемпературных теплотехнологических установок (на примере промышленных топливных печей) приведены на рис. 2.3.

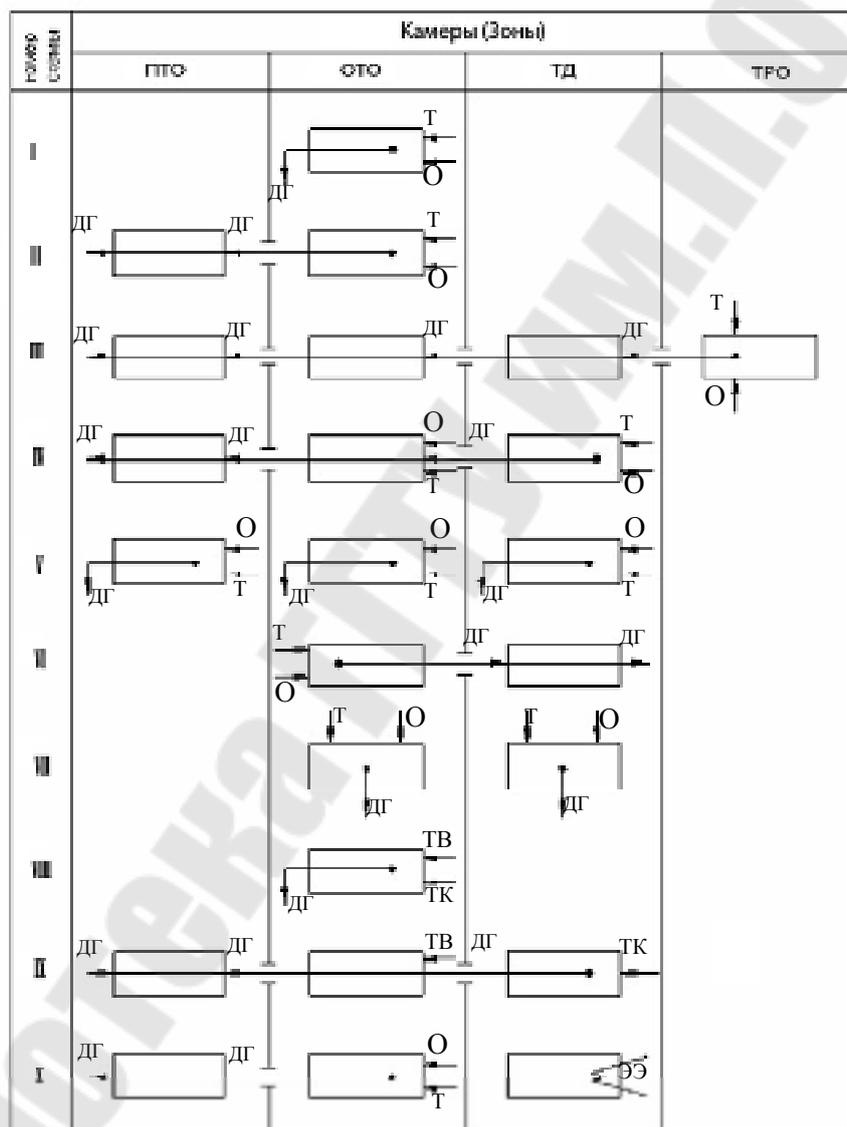


Рис. 2.3. Схемы размещения источников энергии и движения дымовых газов в камерах (зонах) реакторов высокотемпературных технологических установок: I–VIII – схемы с одним источником энергии; IX–X – схемы с комбинированным источником энергии; ТВ, ТК, ЭЭ – соответственно топливно-воздушный, топливно-кислородный и электрический источники энергии; ДГ – дымовые газы; Т – топливо; О – окислитель

Из рис. 2.3 следует, что, как правило, в зонах (камерах) ОТО приведенных вариантов реакторов в качестве преимущественного источника энергии используется топливо, в зонах (камерах) НТО – дымовые газы от ЗОТО и КОТО, в зонах (камерах) ТД могут использоваться различные источники энергии (ТВ, ЭЭ, ПГ, ТК).

В теплотехнологических реакторах используются различные теплотехнические принципы организации технологических процессов или их отдельных стадий:

- принцип плотного фильтруемого слоя (определенная совокупность условий тепловой обработки свободной засыпки дробленых материалов, мелких изделий и других тел, продуваемой газовым теплоносителем);

- принцип «кипящего» слоя (тепловая обработка зеренных или грубо измельченных материалов в условиях газового псевдооживления);

- принцип взвешенного слоя (различные виды и приемы тепловой обработки измельченных материалов в условиях газозвеси);

- принцип пересыпающегося слоя (тепловая обработка газовым теплоносителем сыпучего материала, перемещаемого различными способами);

- принцип уложенных загрузок (тепловая обработка укладки изделий или полуфабрикатов, продуваемой газовым теплоносителем);

- принцип излучающего факела (тепловая обработка тел газовым теплоносителем с высокими радиационными характеристиками);

- принцип поверхностного излучателя (нагрев с помощью излучающих твердых тел);

- принцип погруженного факела (тепловая обработка жидких сред, растворов, расплава, материалов в расплаве, продуваемых газовым теплоносителем);

- принцип комбинированный (тепловая обработка материалов в условиях последовательного использования двух или более отдельных теплотехнических принципов).

3. Тепловые схемы высокотемпературных технологических установок с топливным источником энергии

Тепловая схема теплотехнологической установки с одним структурным элементом – однокамерным однозонным реактором (с камерой ОТО), получившая название элементарная тепловая схема, приведена на рис. 3.1. В теплотехнологической установке с элемен-

тарной тепловой схемой температура отходящих из реактора газов $T_{o.g}$ равна максимальной температуре обрабатываемого материала или больше ее (в установках периодического действия это положение относится к каждому моменту рабочего времени). Теплотехнологические установки с такой тепловой схемой отличаются высоким уровнем удельного расхода топлива на технологический процесс и наиболее низким значением КПД.

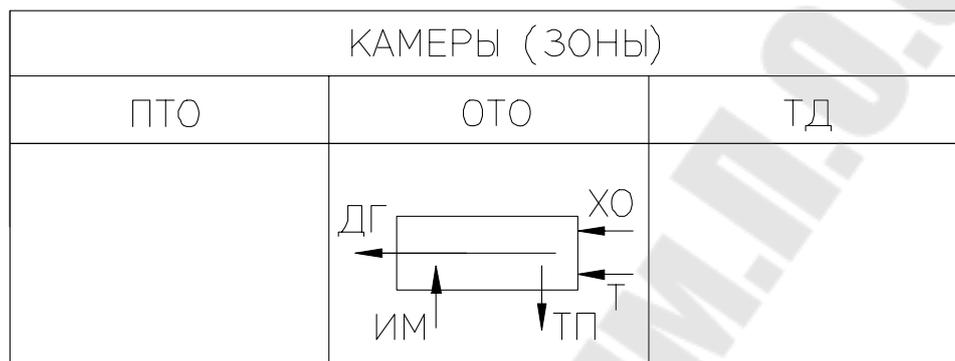


Рис. 3.1. Элементарная тепловая схема высокотемпературной теплотехнологической установки:

ДГ – дымовые газы; ХО – холодный окислитель топлива (воздух; воздух, обогащенный кислородом; кислород); Т – топливо; ИМ, ТП – соответственно исходный материал и технологическая продукция

Тепловые (энергетические, когда отходящие газы, технологические и побочные продукты обладают также и значительной потенциальной энергией) отходы установки с элементарной тепловой схемой складываются из теплоты отходящих из реактора газов; потока теплоты через ограждения теплотехнологического реактора (камеры ОТО); теплоты (энергии) технологической продукции, когда температура $T_{m}^{п.и}$, при которой эта продукция используется, меньше максимальной температуры продукта в реакторе $T_{m}^{макс}$; теплоты (энергии) сопутствующих технологических продуктов и полуфабрикатов (при $T_{m}^{п.и} < T_{m}^{макс}$). Эти отходы теплоты можно использовать по трем направлениям: регенеративное, внешнее регенеративное и внешнее (комплексное, смешанное).

Регенерация энергетических отходов ВТУ – прямой способ снижения энергозатрат на теплотехнологический процесс преобразования энергии отходов в энергию теплоносителей, вводимых в высокотемпера-

турные зоны технологического реактора. Элементы тепловой схемы ВТУ, в которых осуществляется указанное преобразование энергии называются регенеративными устройствами, а входящие в высокотемпературные зоны реактора тепло-, энергоносители – регенерирующими.

Внешнее использование энергетических отходов ВТУ – косвенный способ экономии энергозатрат. В этом случае тепловые (энергетические) отходы используются для производства другой технологической или энергетической продукции. Этот способ использования отходов не изменяет видимого, регистрируемого приборами расхода топлива в ВТУ, однако он снижает расход топлива (энергии) в других самостоятельных автономных установках, производящих ту же продукцию, что и дополнительная продукция ВТУ на внешнем теплоиспользовании. Эти самостоятельные установки называют замещаемыми, а экономию топлива при этом – экономией топлива в замещаемой установке. Такое теплоиспользование прямо не решает ни энергетических, ни технологических задач данной теплотехнологической установки, поэтому оно называется внешним теплоиспользованием.

Теплотехнологические установки, реализующие регенеративное и внешнее теплоиспользование, кроме камер реактора, могут иметь дополнительные теплотехнические и теплотехнологические элементы. На рис. 3.2 приведены (для примера построения) тепловые схемы высокотемпературных теплотехнологических установок с учетом этих дополнительных элементов в структурной схеме ВТУ. Схема I соответствует тепловой схеме установки с однокамерным однозонным реактором и регенеративным (на отходящих из реактора дымовых газах) подогревателем воздуха – окислителя топлива (аналогом этой установки может рассматриваться мартеновская печь). Схема II иллюстрирует тепловую схему установки с подогревателем воздуха и котлом-утилизатором, вырабатывающим водяной пар на внешние нужды (внешнее использование теплоты дымовых газов после подогревателя воздуха). Котел-утилизатор включает: экономайзер (Э), испарительные поверхности (ИП), пароперегреватель (ПП). Отмеченные элементы котла-утилизатора также вписываются в рамки приведенной структурной схемы ВТУ. Аналогом установки со схемой II также может рассматриваться мартеновская печь, но с котлом-утилизатором.

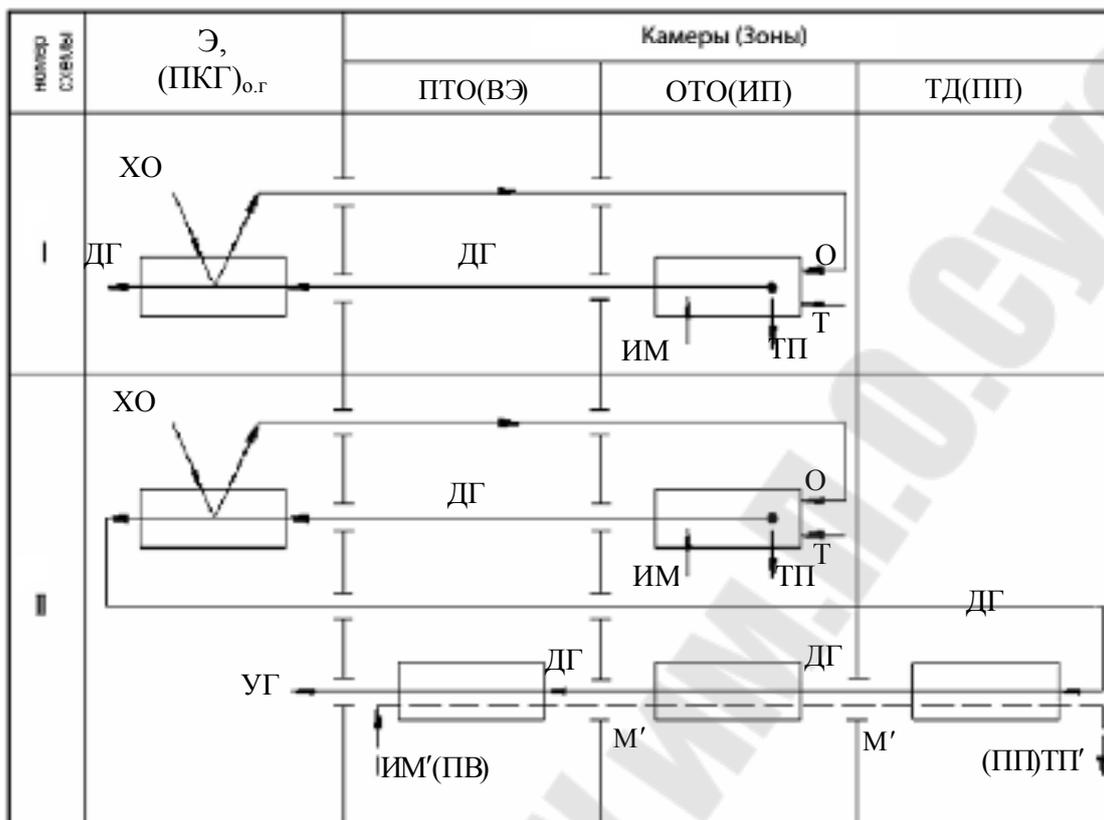


Рис. 3.2. Примеры построения тепловых схем

высокотемпературной теплотехнологической установки:

- Э – элемент; (ПКГ)_{о.г} – элементы подогрева (включая и термическую обработку топлива компонентов горения на отходящих газах реактора ВТУ; ВЭ – водяной экономайзер; ИП – испарительная поверхность теплотехнологической установки; ПП – пароперегреватель, перегретый пар; ХО – исходный (холодный) окислитель топлива; О – нагретый окислитель топлива; ДГ – дымовые газы; УГ – уходящие газы; ИМ – исходный материал (шихта); М – материал (после неполной обработки исходного материала); ТП – технологический продукт или полуфабрикат; ПВ – питательная вода

4. Материальные, тепловые и энергетические балансы

4.1. Структура уравнений материальных балансов

Материальные балансы, являющиеся аналитическим, табличным или графическим выражением закона сохранения массы в высокотемпературном теплотехнологическом процессе, широко используются в практике планирования и учета расхода минеральных

ресурсов. Они служат для проверки правильности определения удельных расходов исходных компонентов или удельного выхода продуктов процесса, являются исходной базой для составления тепловых балансов высокотемпературной теплотехнологической установки и элементов ее тепловой схемы.

Различают следующие разновидности материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических процессов (ВТП):

- материальный баланс компонентов;
- материальный баланс веществ;
- материальный баланс химических элементов.

Обычно уравнения материальных балансов составляются в килограммах (компонентов, веществ, элементов) на килограмм технологического продукта (технологического сырья). Выбор тех или иных единиц измерения диктуется исключительно соображениями удобства составления и использования материального баланса; необходимо только внимательно следить за тем, чтобы выбранную единицу имели все без исключения слагаемые уравнения материального баланса.

Уравнение материального баланса компонентов, кг/кг технологического продукта:

$$m_{Т.с} + m_{Т} + m_{ок} + m_{в} + m_{обм} = 1 + m_{шл} + m_{ун} + m_{г.о}, \quad (4.1)$$

где $m_{Т.с}$, $m_{Т}$, $m_{ок}$, $m_{в}$ – удельные расходы технологического сырья, топлива, окислителя и восстановителя; $m_{обм}$ – удельный износ футеровки теплотехнологического реактора; $m_{шл}$, $m_{ун}$, $m_{г.о}$ – удельные выходы шлака, уноса частиц и газообразных отходов.

Рассматривая уравнение (4.1) как базу для составления теплового баланса, можно принять, что $m_{обм} = 0$, а $m_{ун}$ известен как функция аэромеханических условий в рабочем пространстве; для большинства установок можно исходить из условия, что $m_{ун} = 0$.

Удельный расход топлива $m_{Т}$, как будет показано ниже, может быть определен из уравнения теплового баланса теплотехнологического реактора, если известны все остальные m , входящие в уравнение (4.1). Поэтому практически вместо (4.1) удобнее использовать два независимых уравнения материального баланса: по компонентам топочного процесса, кг/кг топлива или кг/м³ топлива, и по компонентам технологического процесса, кг/кг технологического продукта:

$$1 + m_{\text{ок}}^{\text{T}} = m_{\text{п.г}} + m_{\text{ун}}^{\text{T}} + m_{\text{ш.о}}^{\text{T}}; \quad (4.2)$$

$$m_{\text{т.с}} + m_{\text{ок}}^{\text{техн}} \text{ (или } m_{\text{в}}) = 1 + m_{\text{ш.о}}^{\text{техн}} + m_{\text{ун}}^{\text{техн}} + m_{\text{г.о}}^{\text{техн}}, \quad (4.3)$$

где $m_{\text{ок}}^{\text{T}}$ – удельный расход окислителя топочного процесса; $m_{\text{п.г}}$, $m_{\text{ун}}^{\text{T}}$, $m_{\text{ш.о}}^{\text{T}}$ – удельные выходы продуктов горения, уноса и шлаковых отходов топочного процесса соответственно; $m_{\text{ок}}^{\text{техн}}$ – удельный расход окислителя технологического процесса; $m_{\text{г.о}}^{\text{техн}}$, $m_{\text{ун}}^{\text{техн}}$, $m_{\text{ш.о}}^{\text{техн}}$ – удельные выходы газовых отходов, уноса и шлаковых отходов технологического процесса.

Такая замена (4.1) на (4.2) и (4.3) исключает из уравнений материального баланса удельный расход топлива.

При реализации теплотехнологического процесса в автотермических, электротермических и гелиоустановках, для которых $m_{\text{т}} = m_{\text{ок}}^{\text{T}} = m_{\text{п.г}} = m_{\text{ун}}^{\text{T}} = m_{\text{ш.о}}^{\text{T}} = 0$, уравнение (4.1) преобразуется в (4.3).

Для определения состава продуктов теплотехнологического процесса необходимо знать удельные выходы всех веществ, входящих в компоненты процесса. Их можно найти, если наряду с уравнениями (4.2) и (4.3) использовать также уравнения материальных балансов по веществам, входящим в состав компонентов топочного и технологического процессов:

$$\sum m_{j\text{п}}^{\text{T}} = \sum m_{j\text{и}}^{\text{T}}; \quad (4.4)$$

$$\sum m_{j\text{п}}^{\text{техн}} = \sum m_{j\text{и}}^{\text{техн}}, \quad (4.5)$$

где $m_{j\text{и}}^{\text{T}}$ и $m_{j\text{и}}^{\text{техн}}$ – удельные расходы j -х веществ, вводимых соответственно в топочный и технологический процессы; $m_{j\text{п}}^{\text{T}}$ и $m_{j\text{п}}^{\text{техн}}$ – удельные выходы j -х веществ, входящих в состав продуктов топочного и технологического процессов.

Неизвестные слагаемые уравнений (4.4) и (4.5) определяются из расчетов материальных балансов горения и технологического процесса, в которых широко используются уравнения материальных балансов химических элементов.

4.2. Расчеты материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических процессов

В расчетах материальных балансов, для краткости именуемых далее материальными расчетами, определяются неизвестные слагаемые материальных балансов. Различают две характерные постановки задач материальных расчетов: при первой задан состав только исходных компонентов, при второй – и исходных компонентов, и продуктов процесса.

Из большого многообразия решаемых задач можно выделить материальные расчеты идеальных, неравновесных и равновесных процессов.

В материальных расчетах идеальных процессов принимается, что реагирующие вещества исходных компонентов поступают и расходуются в соотношениях, определяемых стехиометрией химических реакций, каждая из которых протекает необратимо до полного превращения исходных реагентов в продукты процесса. С учетом этих допущений для выполнения материального расчета идеального процесса помимо состава исходных компонентов необходимо дополнительно знать только перечень химических реакций. Указанная исходная информация достаточна для нахождения из стехиометрических соотношений удельных выходов продуктов процесса, их состава, а также удельных расходов исходных компонентов.

Для примера рассмотрим алгоритм материального расчета идеального процесса паровой газификации углерода.

Исходные данные задачи: состав топлива – $C^p = 100 \%$; состав окислителя – $H_2O_{ок} = 100 \%$; химическая реакция газификации $C + H_2O = H_2 + CO$.

Искомые параметры: удельный расход окислителя $m_{ок}$, кг/кг; удельные выходы генераторного газа $v_{г.г}$ и его составляющих $v_{H_2}^0$, v_{CO}^0 , м³/кг.

Из стехиометрии реакции известно, что на газификацию 1 кмоль углерода расходуется 1 кмоль водяного пара и при этом получается по 1 кмолью водорода и оксида углерода. Следовательно,

$$m_{ок}^0 = \frac{M(H_2O)}{M(C)};$$

$$v_{\text{H}_2}^0 = \frac{V_{\text{M}}(\text{H}_2)}{M(\text{C})};$$

$$v_{\text{CO}}^0 = \frac{V_{\text{M}}(\text{CO})}{M(\text{C})} \text{ и } v_{\text{г.г}}^0 = v_{\text{H}_2}^0 + v_{\text{CO}}^0,$$

где $M(\text{H}_2\text{O})$, $M(\text{C})$ – молярные массы соответственно воды и углерода, кг/кмоль; $V_{\text{M}}(\text{H}_2)$, $V_{\text{M}}(\text{CO})$ – молярные объемы соответственно водорода и оксида углерода, м³/кмоль.

При первой постановке задач материального расчета неравновесных процессов дополнительно к составу исходных компонентов и перечню химических реакций необходима еще исходная информация о степени завершения каждой из химических реакций и (в случае исходных материалов многокомпонентного состава) о соотношении расходов отдельных компонентов. Для исходных веществ, которые, не реагируя, переходят в продукты процесса, удобно принять, что они участвуют в реакции, степень завершения которой равна нулю. Искомые параметры здесь те же, что и в рассмотренной выше задаче материального расчета идеального процесса; для их определения по-прежнему используются стехиометрические соотношения химических реакций, но с учетом заданной степени их завершения.

4.3. Тепловой баланс теплотехнологического реактора

Основными инструментами, с помощью которых оценивают достигнутый уровень полезного энергоиспользования и выявляют пути дальнейшей рационализации энергопотребления, служат: тепловые балансы теплотехнологического реактора (ТР), его отдельных зон, теплотехнических элементов ВТУ; тепловые и энергетические балансы высокотемпературной теплотехнологической установки в целом.

Уравнение теплового баланса ТР, являющееся аналитическим выражением закона сохранения энергии, в наиболее общем случае имеет вид:

$$Q_{\text{эл}}^{\text{T}} + Q_{\text{х.т}} + Q_{\text{ф.т}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{экз}} =$$

$$= Q_{\text{т.п}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{ш.о}} + Q_{\text{ун}} + Q_{\text{о.г}} + Q_{\text{в.г}} + Q_{\text{н.г}} + Q_{\text{о.с}} + Q_{\text{ак}}. \quad (4.6)$$

Использованные здесь обозначения раскрыты в табл. 4.1. Единицы величин (4.6) выбирают с учетом специфики теплотехнологического процесса и содержания конкретной задачи, решаемой с исполь-

зованием этого уравнения; во многих случаях удобнее составлять уравнение (4.6) в килоджоулях на килограмм технологического продукта (кДж/кг) или в киловаттах (кВт).

По характеру зависимости статей теплового баланса от видимого удельного расхода топлива b их можно разделить на три группы. Значения слагаемых первой группы пропорциональны b , к ним относятся:

$$Q_{x.г} = b \cdot Q_n^p; \quad Q_{ф.г} = b \cdot H_T; \quad Q_{н.г} = b \cdot H_{н.г},$$

где Q_n^p , H_T , $H_{н.г}$ – соответственно теплота сгорания топлива, энтальпия топлива и неполноты горения, кДж/кг топлива.

Ко второй группе относятся статьи теплового баланса $Q_{т.м}$, Q_v , $Q_{т.п}$, $Q_{экз}$, $Q_{энд}$, $Q_{о.с}$, $Q_{ак}$, значения которых не зависят от b . К этой же группе отнесем и $Q_{эл}^T$, полагая, что удельный расход электроэнергии как источника тепловой энергии задан для топливно-электрической ВТУ параметрически. Третью группу образуют статьи теплового баланса $Q_{ок}$, $Q_{о.г}$, $Q_{в.г}$, $Q_{ш.о}$, $Q_{ун}$, каждое из которых в общем случае выражается как сумма двух слагаемых, одно из которых пропорционально b , а второе от b не зависит, например:

$$Q_{о.г} = Q_{о.г}^T + Q_{о.г}^{техн} = b \cdot H_{о.г}^T + Q_{о.г}^{техн},$$

где $H_{о.г}^T$ – энтальпия содержащихся в отходящих газах продуктов горения, кДж/кг топлива; $Q_{о.г}^{техн}$ – теплота отходящих газов технологического процесса, кДж/кг.

Таблица 4.1

Структура теплового баланса теплотехнологического реактора

Название статьи прихода	Обозначение
Электроэнергия как источник теплоты	$Q_{эл}^T$
Химическая энергия топлива	$Q_{x.г}$
Теплота топлива	$Q_{ф.г}$
Теплота окислителя	$Q_{ок}$
Теплота исходных технологических материалов	$Q_{т.м}$
Теплота восстановителя	Q_v
Тепловой эффект экзотермических реакций в технологической зоне	$Q_{экз}$
Всего	$Q_{прих}$

Название статьи расхода	Обозначение
Теплота технологического продукта	$Q_{т.п}$
Тепловой эффект эндотермических реакций	$Q_{энд}$
Теплота отходящих газов	$Q_{о.г}$
Теплота выбивающихся газов	$Q_{в.г}$
Теплота шлаковых отходов	$Q_{ш.о}$
Тепловая энергия в уносе	$Q_{ун}$
Потери теплоты от неполноты горения топлива:	$Q_{н.г}$
– при химическом недожоге	$Q_{х.н}$
– при механическом недожоге	$Q_{м.н}$
Потери теплоты в окружающую среду:	$Q_{о.с}$
– теплопроводностью через обмуровку	$Q_{о.с}^T$
– излучением через отверстия окна	$Q_{о.с}^{изл}$
– через поверхность охлаждаемых элементов	$Q_{о.с}^{охл}$
– с транспортными устройствами	$Q_{о.с}^{тр}$
Расход теплоты на разогрев обмуровки	$Q_{ак}$
Всего	$Q_{расх}$

Из уравнения (4.6) при $Q_{ак} = 0$ (случай стационарного теплового состояния реактора) получим следующую расчетную формулу:

$$b = \frac{Q_{техн} + Q_{о.с} - Q_{эл}^T}{H_p^T + H_{пот}^T}, \quad (4.7)$$

где $Q_{техн}$ – потребление теплоты технологическими материалами; H_p^T – располагаемая теплота топочного процесса; $H_{пот}^T$ – тепловые и горючие потери (отходы) топочного процесса, кДж/кг топлива.

$$Q_{техн} = Q_{т.п} + Q_{энд} + Q_{о.г}^{техн} + Q_{в.г}^{техн} + Q_{ш.о}^{техн} + Q_{ун}^{техн} - Q_p^{техн},$$

где $Q_p^{техн}$ – располагаемая теплота технологического процесса.

$$Q_p^{техн} = Q_{т.м} + Q_a \text{ (или } Q_{ок}^{техн} \text{)} + Q_{экз}.$$

$$H_p^T = Q_H^p + H_T + H_{ок}^T,$$

где $H_{ок}^T$ – теплота окислителя топочного процесса.

$$H_{пот}^T = H_{ог}^T + H_{в.г}^T + H_{ш.о}^T + H_{ун}^T + H_{н.г}.$$

Технологические процессы, для которых $Q_{техн} \leq 0$, называются автогенными. Возможность реализации таких процессов определяется условием:

– в автотермических установках, т. е. при нулевом расходе топлива и электроэнергии:

$$Q_{техн} + Q_{о.с} \leq 0;$$

– в топливно-электрических ВТУ:

$$Q_{эл}^T < (Q_{техн} + Q_{о.с}) \leq 0 \text{ и } b > 0;$$

– в электротермических ВТУ:

$$Q_{эл}^T = Q_{техн} + Q_{о.с} > 0 \text{ и } b = 0;$$

– в топливных ВТУ:

$$Q_{эл}^T = 0, \quad Q_{техн} + Q_{о.с} > 0 \text{ и } b = 0.$$

Для определения i -го слагаемого из числа входящих в $Q_{техн}$, за исключением $Q_{энд}$ и $Q_{экз}$, используется формула (4.8) или (4.9):

$$Q_i = m_i \cdot c_i \cdot t_i \text{ при } t_i < t_{\phi i}; \quad (4.8)$$

$$Q_i = m_i \cdot [c'_i \cdot t_{\phi i} + r_i + c''_i \cdot (t_i - t_{\phi i})] \text{ при } t_i \geq t_{\phi i}, \quad (4.9)$$

где m_i – удельный расход (или выход) i -го слагаемого материального баланса технологического процесса, кг/кг; c_i, c'_i, c''_i – удельные теплоемкости i -го слагаемого материального баланса технологического процесса, средние в температурных интервалах соответственно $0-t$, $0-t_{\phi i}$, $t_{\phi i}-t_i$, кДж/(кг · К); $t_{\phi i}$ и t_i – температуры фазового превращения i -го слагаемого материального баланса на входе в рабочую камеру или на выходе из нее, °С; r_i – теплота фазового превращения i -го слагаемого материального баланса технологического процесса.

Входящая в выражение для $Q_{\text{техн}}$ разность $Q_{\text{энд}} - Q_{\text{экз}}$ находится из формулы

$$Q_{\text{энд}} - Q_{\text{экз}} = \sum \sigma_{\text{энд}j} \cdot m_{\text{энд}j} \cdot Q_{\text{энд}j} - \sum \sigma_{\text{экз}j} \cdot m_{\text{экз}j} \cdot Q_{\text{экз}j}, \quad (4.10)$$

где $m_{\text{энд}j}$, $m_{\text{экз}j}$ – удельные расходы j -х веществ, участвующих в эндотермических и экзотермических реакциях, кг/кг; $Q_{\text{энд}j}$, $Q_{\text{экз}j}$ – тепловые эффекты эндотермических и экзотермических реакций, кДж/кг j -го вещества; $\sigma_{\text{энд}j}$, $\sigma_{\text{экз}j}$ – степени завершения j -й эндотермической и j -й экзотермической реакций.

Расчет слагаемых $Q_{\text{о.с}}$ проводится по формулам:

$$Q_{\text{о.с}}^{\text{T}} = \frac{\sum q_{\text{о.с}i}^{\text{T}} \cdot F_{\text{обм}i}}{P}; \quad (4.11)$$

$$Q_{\text{о.с}}^{\text{изл}} = \frac{\sum q_{\text{о.с}i}^{\text{изл}} \cdot F_{\text{о}i}}{P}; \quad (4.12)$$

$$Q_{\text{о.с}}^{\text{охл}} = \frac{\sum q_{\text{о.с}i}^{\text{охл}} \cdot F_{\text{охл}i}}{P}; \quad (4.13)$$

$$Q_{\text{о.с}}^{\text{тр}} = \frac{P_{\text{тр}} \cdot (h_{\text{тр}}'' - h_{\text{тр}}')}{P}, \quad (4.14)$$

где $q_{\text{о.с}i}^{\text{T}}$, $q_{\text{о.с}i}^{\text{изл}}$, $q_{\text{о.с}i}^{\text{охл}}$ – плотности теплового потока соответственно через i -й участок внутренней поверхности обмуровки с площадью $F_{\text{обм}i}$, через i -е окно с открытым сечением $F_{\text{о}i}$, через тепловоспринимающую поверхность $F_{\text{охл}i}$ i -го охлаждаемого элемента теплотехнического реактора, кВт/м²; P – производительность ВТУ, кг/с; $P_{\text{тр}}$ – расход массы транспортных устройств, проходящих через рабочее пространство, кг/с; $h_{\text{тр}}'$, $h_{\text{тр}}''$ – энтальпии материала транспортных устройств на входе в ТР и на выходе из него, кДж/кг.

При составлении теплового баланса ТР действующей установки плотность теплового потока в окружающую среду с наружной поверхности обмуровки $q_{\text{о.с}i}^{\text{нар}}$ может быть непосредственно измерена те-

плотностью или рассчитана по измеренным температурам наружной поверхности $t_i^{\text{нар}}$ и окружающей среды $t_{\text{о.с}}$:

$$q_{\text{о.с.}i}^{(\text{T})\text{нар}} = \alpha_i^{\text{нар}} \cdot (t_i^{\text{нар}} - t_{\text{о.с}}),$$

где $\alpha_i^{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи с i -го участка наружной поверхности обмуровки, кВт/(м² · К).

Если по толщине обмуровки отсутствуют стоки теплоты, то

$$q_{\text{о.с.}i}^{\text{T}} = q_{\text{о.с.}i}^{(\text{T})\text{нар}} \cdot \frac{F_{\text{обм}i}^{\text{нар}}}{F_{\text{обм}i}},$$

где $F_{\text{обм}i}^{\text{нар}}$ – площадь i -го участка наружной поверхности обмуровки.

Чем больше линейные размеры рабочего пространства, чем ближе отношение $\frac{F_{\text{обм}i}^{\text{нар}}}{F_{\text{обм}i}}$ к единице, тем с большим основанием можно принимать, что $q_{\text{о.с.}i}^{\text{T}} \approx q_{\text{о.с.}i}^{(\text{T})\text{нар}}$.

Для проектируемой ВТУ плотность теплового потока $q_{\text{о.с.}i}^{\text{T}}$ вычисляется из формулы для теплопередачи, например:

$$q_{\text{о.с.}i}^{\text{T}} = \frac{t_{\text{г}i} - t_{\text{о.с}}}{\frac{1}{\alpha_i^{\text{вн}}} + \sum \frac{\delta_{ij}}{\lambda_{ij}} + \frac{1}{\alpha_i^{\text{нар}}}},$$

где $\alpha_i^{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от рабочего пространства к i -му участку внутренней поверхности обмуровки; δ_{ij} – толщина j -го слоя обмуровки на i -м участке; λ_{ij} – теплопроводность материала j -го слоя обмуровки на i -м участке; $\alpha_i^{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду от i -го участка наружной поверхности обмуровки; $t_{\text{г}i}$ – температура газов в i -м участке рабочего пространства ВТУ.

В случае кирпичной кладки и монолитных обмуровок первым слагаемым в сумме термических сопротивлений обычно можно пренебречь, в случае гарниссажных обмуровок этого делать нельзя.

Так как коэффициенты λ_{ij} зависят от температуры, то приходится задаваться начальным приближением температуры каждого j -го слоя t_{ij} с последующим ее уточнением.

Плотность потока излучения рабочего пространства в окружающую среду через i -е окно:

$$q_{o.c_i}^{изл} = 5,67 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \cdot \varphi_i \cdot \psi_i,$$

где T_i – температура рабочего пространства ВТУ для i -го участка обмуровки, К; ψ_i – доля времени, в течение которого i -е окно находится в открытом состоянии; для постоянно открытого окна $\psi_i = 1$; φ_i – обобщенный угловой коэффициент переноса лучистой энергии через отверстие (окно) в обмуровке находится из графиков рис. 4.1.

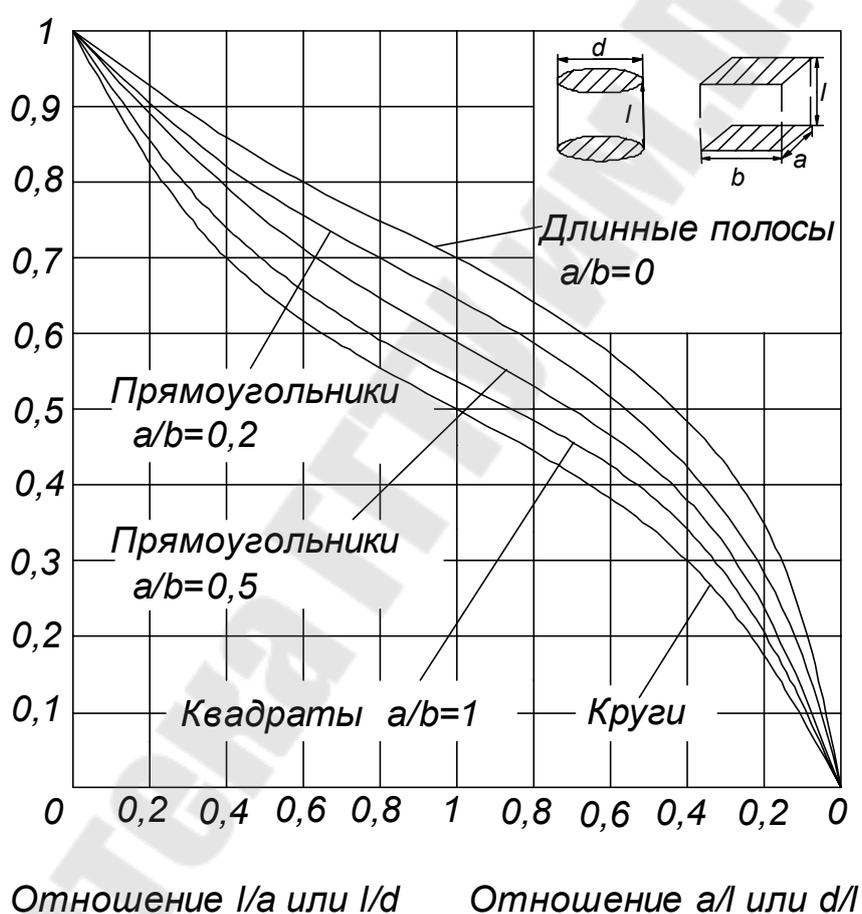


Рис. 4.1. Обобщенный угловой коэффициент переноса лучистой энергии через i -е отверстие (окно) в обмуровке

Значение $q_{o.c_i}^{охл}$ вычисляется или аналогично $q_{o.c_i}^T$ по формулам теплопередачи, или по эмпирическим формулам, составленным для конкретных охлаждаемых элементов конкретной высокотемпературной теплотехнологической установки, либо принимается по практи-

ческим данным. Для действующей теплотехнологической установки $Q_{o.c}^{oxl}$ вычисляют по измеренному в эксперименте расходу охлаждающего агента P_{oxl} и его температурам t'_{oxl_i} и t''_{oxl_i} соответственно на входе в i -й охлаждаемый элемент и на выходе из него:

$$Q_{o.c}^{oxl} - Q_{экз} = \sum P_{oxl_i} \cdot (c''_{oxl_i} \cdot t''_{oxl_i} - c'_{oxl_i} \cdot t'_{oxl_i}) \cdot P,$$

где c'_{oxl_i} , c''_{oxl_i} – удельные теплоемкости охлаждающего агента, средние в температурных интервалах $0 - t'_{oxl_i}$ и $0 - t''_{oxl_i}$ соответственно, кДж/(кг · К).

Значения величин, входящих в H_p^T и $H_{пот}^T$, кроме Q_H^p и $H_{н.г}$, рассчитываются из следующих формул:

$$H_T = c_T \cdot t''_T; H_{ок}^T = v_{ок}^T \cdot c_{ок} \cdot t''_{ок}; H_{o.г}^T = (1 - \phi_B) v_{п.г} \cdot c_{п.г}^{o.г} \cdot t_{o.г};$$

$$H_{в.г}^T = \phi_B \cdot v_{п.г} \cdot c_{п.г}^{в.г} \cdot t_{в.г}; H_{ш.о}^T = m_{ш.о}^T \cdot c_{ш.о} \cdot t_{ш.о}; H_{ун}^T = m_{ун}^T \cdot c_{ун} \cdot t_{ун},$$

где c_T , $c_{ок}$ – удельные теплоемкости топлива и окислителя топочного процесса, средние в температурных интервалах соответственно $0 - t''_{ок}$ и $0 - t'_{ок}$, кДж/(м³ · К); $c_{п.г}^{o.г}$, $c_{п.г}^{в.г}$ – удельные теплоемкости продуктов горения, средние в температурных интервалах соответственно $0 - t_{o.г}$ и $0 - t_{в.г}$, кДж/(м³ · К); $c_{ш.о}$, $c_{ун}$ – удельные теплоемкости шлаковых отходов и уноса топочного процесса, средние в температурных интервалах соответственно $0 - t_{ш.о}$ и $0 - t_{ун}$, кДж/(кг · К); t''_T , $t''_{ок}$ – температуры топлива и окислителя топочного процесса при входе в рабочую камеру, °С; $t_{o.г}$, $t_{в.г}$, $t_{ш.о}$, $t_{ун}$ – температуры соответственно отходящих газов, выбивающихся газов, шлаковых отходов и уноса топочного процесса на выходе из рабочей камеры, °С; $v_{o.к}^T$, $v_{п.г}$ – удельный расход окислителя топочного процесса и удельный выход продуктов горения, м³ на единицу топлива; $m_{ш.о}^T$, $m_{ун}^T$ – удельные выходы шлаковых отходов и уноса топочного процесса, кг на единицу топлива; ϕ_B – коэффициент выбивания продуктов горения.

Теплота сгорания топлива Q_H^p , как правило, принимается по справочным данным или вычисляется по составу топлива. Для определения $H_{х.н}$ и $H_{м.н}$ широко используют промышленные данные об относительной неполноте горения:

$$\left. \begin{aligned} H_{x,h} &= 0,01q_{x,h} \cdot Q_H^p; \\ H_{m,h} &= 0,01q_{m,h} \cdot Q_H^p. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Потеря теплоты с механическим недожогом $H_{m,h}$ может также рассчитываться по эмпирическим данным о теплоте сгорания шлаковых отходов и уноса топочного процесса и их удельном выходе:

$$H_{m,h} = m_{ш,о}^T (Q_H^p)_{ш,о}^T + m_{ун}^T (Q_H^p)_{ун}^T. \quad (4.16)$$

Если топливо сжигается в рабочем пространстве с коэффициентом расхода окислителя меньше единицы, а также при высоких $t_{o,г}$ и $t_{в,г}$, превышающих температуру начала термической диссоциации многоатомных молекул, значение $H_{x,h}$ можно, по крайней мере, в первом приближении, оценить по равновесному составу отходящих и выбивающихся газов:

$$H_{x,h} = v_{п,г}^p \left[(1 - \varphi_B) \cdot Q_{п,г}^{o,г} + \varphi_B \cdot Q_{п,г}^{в,г} \right], \quad (4.17)$$

где $v_{п,г}^p$ – удельный выход продуктов горения равновесного состава, м³/кг топлива; $Q_{п,г}^{o,г}$, $Q_{п,г}^{в,г}$ – теплота сгорания продуктов горения равновесного состава при $t = t_{o,г}$ и $t = t_{в,г}$, кДж/м³.

$$Q_{п,г} = 126,4 \cdot CO^p + 108 \cdot H_2^p + 358 \cdot CH_4^p,$$

где CO^p , H_2^p , CH_4^p – концентрации CO, H₂, CH₄ в продуктах горения равновесного состава.

При составлении теплового баланса теплотехнологического реактора действующей установки значения $H_{x,h}$ вычисляются по формуле (4.17), но $v_{п,г}$ и $Q_{п,г}$ рассчитываются по фактическому (найденному газовым анализом) составу продуктов горения.

4.4. Зональные тепловые балансы теплотехнологического реактора. Тепловые балансы отдельных элементов тепловой схемы высокотемпературной теплотехнологической установки

Наряду с уравнением теплового баланса теплотехнологического реактора широко используются уравнения зональных тепловых балансов, т. е. тепловых балансов отдельных зон (камер) ТР. Уравнения

тепловых балансов отдельных зон существенно отличаются друг от друга по составу приходных и расходных статей; для каждой из зон уравнение зависит также от структурной схемы ТР, которая влияет и на характер задач, решаемых с использованием зональных тепловых балансов.

Для теплотехнологического реактора со структурной схемой, представленной на рис. 4.2, можно составить четыре зональных тепловых баланса. Если видимый расход топлива b определен из теплового баланса реактора и задана температура $t_{o.r_1}$ ($t_{o.r_1} \geq t_{т.п}^{макс}$), то из уравнения теплового баланса зоны предварительной теплотехнологической обработки (ПТО) при заданной температуре $t_{o.r_1}$ ($t_{o.r_1} \geq t_{т.п}^{макс}$) находят t_{m_1} – температуру технологических материалов на выходе из зоны ПТО. Если окажется, что $t_{m_1} \geq t_{o.r_1}$, то это свидетельствует о термодинамической неосуществимости теплотехнологического процесса при заданных выше его входных и выходных параметрах. Для обеспечения неравенства $t_{m_1} < t_{o.r_1}$ необходимо их целенаправленное изменение. Для конкретных теплотехнических условий в зоне ПТО на уровень t_{m_1} могут накладываться и другие ограничения. Например, если предварительная обработка осуществляется в фильтруемом плотном слое кусков, то их температура может быть ограничена температурой спекания $t_{сп}$; в этом случае полученный из теплового баланса зоны ПТО результат $t_{m_1} > t_{сп}$ свидетельствует о технической неосуществимости процесса.

Уравнения тепловых балансов зон основной технологической обработки, технологической дообработки и технологически регламентированного охлаждения позволяют найти видимый расход топлива в каждой из зон, если дополнительно заданы $t_{o.r_2}$, $t_{o.r_3}$, t_{m_2} , t_{m_3} и известны тепловые потоки через ограждение каждой из зон. Так как видимый расход топлива на теплотехнологический процесс равен сумме видимых расходов по зонам, то либо тепловой баланс ТР, либо один из зональных тепловых балансов может быть использован для проверки правильности расчетов.

Структура тепловых балансов теплотехнологического реактора и его отапливаемых зон (на схеме рис. 4.2 это зоны ОТО, ТД и ТРО)

отличаются незначительно; в тепловых балансах зон ОТО и ТРО отсутствует $Q_{\text{Э.Э}}^T$, а в приходной части – группа слагаемых $Q_{\text{О.Г}_2}$, $Q_{\text{Х.Н}_2}$, $Q_{\text{УН}_2}$ (зона ОТО) и $Q_{\text{О.Г}_3}$, $Q_{\text{Х.Н}_3}$, $Q_{\text{УН}_3}$ (зона ТД).

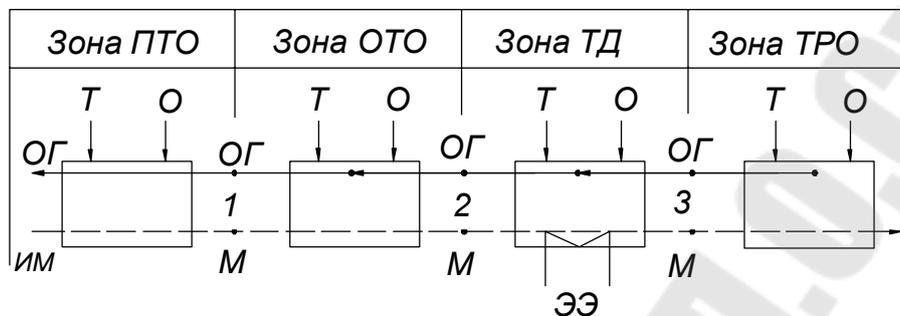


Рис. 4.2. Структурная схема теплотехнологического реактора

Структура теплового баланса неотапываемой зоны ПТО более радикально отличается от структуры теплового баланса ТР, в приходной части теплового баланса зоны ПТО отсутствуют $Q_{\text{Х.Т}}$, $Q_{\text{Ф.Т}}$, $Q_{\text{О.Т}}$, $Q_{\text{В}}$, но дополнительно к $Q_{\text{Т.М}}$ и $Q_{\text{Экз}}$ появляются $Q_{\text{О.Г}_1}$, $Q_{\text{Х.Н}_1}$, $Q_{\text{УН}_1}$.

В тепловом балансе ТР и в зональных тепловых балансах есть статьи одинакового наименования ($Q_{\text{О.Г}}$, $Q_{\text{Т.П}}$, $Q_{\text{Х.Т}}$, $Q_{\text{О.К}}$ и др.); численные значения одних ($Q_{\text{О.Г}}$, $Q_{\text{Т.П}}$) одинаковы в тепловом балансе ТР и в зональных балансах, других ($Q_{\text{Х.Т}}$, $Q_{\text{О.К}}$ и др.) – различны. Поэтому для обозначения последних в зональном балансе целесообразно использовать дополнительные индексы, например: $Q_{\text{Х.Т}}^{\text{ОТО}}$ — химическая энергия топлива, сжигаемого в зоне ОТО; $Q_{\text{Энд}}^{\text{ТД}}$ – тепловой эффект эндотермических реакций, протекающих в зоне ТД, и т. д.

Разновидностью зональных тепловых балансов являются тепловые балансы по периодам технологического процесса, осуществляемого в высокотемпературной теплотехнологической установке циклического действия. Уравнения таких зональных балансов используются при определении характера изменения расхода топлива во времени или характера изменения во времени температурных параметров теплотехнологического реактора при заданных расходах топлива. Подобного рода зональные балансы используются также при исследовании параметров теплотехнологических установок непрерывного действия на стадии их разогрева до стационарного теплового

состояния. В указанных случаях целесообразно все слагаемые балансового уравнения вычислять в килоджоулях на период, продолжительность которого устанавливается с учетом специфики технологического процесса и желательной точности аппроксимации временной зависимости параметров процесса, вычисляемых с использованием уравнений тепловых балансов.

При нестационарном тепловом состоянии теплотехнологического реактора видимый расход топлива B , кг/период или $\text{м}^3/\text{период}$, определяется с учетом теплоты, аккумулированной ограждением, по формуле

$$B = \frac{Q_{\text{техн}} + Q_{\text{о.с}} - Q_{\text{эл}}^{\text{T}} + Q_{\text{ак}}}{H_{\text{р}}^{\text{T}} - H_{\text{пот}}^{\text{T}}}, \quad (4.18)$$

где все Q_i измерены в килоджоулях на период.

Значение $Q_{\text{ак}}$ вычисляется по формуле

$$Q_{\text{ак}} = M_{\text{обм}} (h''_{\text{обм}} - h'_{\text{обм}}), \quad (4.19)$$

где $M_{\text{обм}}$ – масса обмуровки рабочей камеры, кг; $h'_{\text{обм}}$, $h''_{\text{обм}}$ – энтальпии материала обмуровки в начале и конце расчетного периода, кДж/кг.

Теплоту, аккумулированную ограждением ТР, необходимо учитывать и при расчете видимого удельного расхода топлива, в том числе для установок непрерывного действия. Если эти установки в течение суток работают одну или две смены, в этом случае видимый расход топлива вычисляется по формуле

$$b = \frac{Q_{\text{техн}} + Q_{\text{о.с}} - Q_{\text{эл}}^{\text{T}} + Q_{\text{ак}}}{H_{\text{р}}^{\text{T}} - H_{\text{пот}}^{\text{T}}}. \quad (4.20)$$

В отличие от (4.18) здесь $Q_{\text{ак}}$, как и другие слагаемые числителя, измерены в килоджоулях на килограмм. Значение $Q_{\text{ак}}$ определяется по формуле

$$Q_{\text{ак}} = \frac{M_{\text{обм}} (h''_{\text{обм}} - h'_{\text{обм}})}{P_{\text{сут}}}, \quad (4.21)$$

где $h''_{\text{обм}}$ и $h'_{\text{обм}}$ – энтальпии обмуровки перед розжигом теплотехнологической установки и в момент отключения ее, кДж/кг; $P_{\text{сут}}$ – суточная производительность установки, кг/сут.

Переходя к тепловым балансам других элементов тепловой схемы высокотемпературной теплотехнологической установки, необходимо заметить, что их предпочтительно составлять в тех же единицах, что и тепловые балансы теплотехнологического реактора и его зон.

Уравнение теплового баланса автономного подогревателя окислителя имеет вид:

$$Q_{x.T}^{a.п} + Q_{ф.т}^{a.п} + Q_{ок}^{a.п} + Q'_{ок} = Q''_{ок} + Q_{o.г}^{a.п} + Q_{н.г}^{a.п} + Q_{ш.o}^{a.п} + Q_{ун}^{a.п} + Q_{o.c}^{a.п}, \quad (4.22)$$

где $Q'_{ок}$, $Q''_{ок}$ – количества теплоты окислителя, расходуемого на сжигание топлива в ТР, до и после автономного подогревателя ВТУ.

Остальные обозначения в (4.22) те же, что и в (4.6), но верхним индексом «а.п» показана принадлежность соответствующего слагаемого тепловому балансу автономного подогревателя.

Уравнение (4.22) обычно используется для нахождения удельного расхода топлива на подогрев окислителя:

$$b_{a.п} = \frac{Q''_{ок} + Q'_{ок} + Q_{o.c}^{a.п}}{H_p^{a.п} - H_{пот}^{a.п}} = \frac{Q''_{ок} + Q'_{ок}}{29300 \cdot \eta_{a.п}}, \quad (4.23)$$

где $H_p^{a.п} = 29300 + H_T^{a.п} + H_{ок}^{a.п}$, кДж/кг условного топлива; $H_{пот}^{a.п} = H_{o.г}^{a.п} + H_{н.г}^{a.п} + H_{ш.o}^{a.п} + H_{ун}^{a.п}$, кДж/кг условного топлива; $\eta_{a.п}$ – коэффициент полезного использования теплоты топлива в автономном подогревателе, вычисленный в долях единицы.

При расчете $b_{a.п}$ необходимо учитывать, что через автономный подогреватель проходит больше окислителя, чем через топливосжигающее устройство ТР, на количество его утечек в автономном подогревателе и в соединительном трубопроводе, а температура окислителя после автономного подогревателя выше температуры окислителя перед ТР вследствие потерь теплоты через стенки соединительного трубопровода.

Уравнения тепловых балансов автономных подогревателей топлива и восстановителя аналогичны уравнению (4.22), но вместо $Q'_{ок}$ и $Q''_{ок}$ в них будут присутствовать $Q'_{ф.т}$ и $Q''_{ф.т}$ или $Q'_в$ и $Q''_в$, кроме того, в них могут появиться два новых слагаемых: $Q_{экз}^{a.п}$ в левой части уравнения и $Q_{энд}^{a.п}$ – в правой.

Уравнение теплового баланса регенеративного подогревателя компонентов горения (РПКГ) за счет теплоты отходящих из тепло-технологического реактора газов имеет вид:

$$\begin{aligned} Q'_{0.г} + Q'_{ун} + Q'_{н.г} + Q'_{ф.т} + Q'_{0.к} + Q_{\text{ЭКЗ}}^{\text{РПКГ}} &= \\ = Q''_{ф.т} + Q''_{0.к} + Q_{\text{ЭНД}}^{\text{РПКГ}} + Q''_{0.г} + Q''_{ун} + Q''_{н.г} + Q_{0.с}^{\text{РПКГ}}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

где $Q_{0.с}^{\text{РПКГ}}$ – тепловой поток в окружающую среду через ограждение РПКГ; $Q_{\text{ЭКЗ}}^{\text{РПКГ}}$, $Q_{\text{ЭНД}}^{\text{РПКГ}}$ – тепловые эффекты реакций термохимической переработки топлива в РПКГ; индексами ' и '' в (4.24) обозначены количества теплоты соответствующих теплоносителей на входе в РПКГ и на выходе из него.

При составлении уравнения (4.24) помимо замечаний, аналогичных сделанным выше к расчету $b_{a.п}$, необходимо принимать во внимание, что расход отходящих газов и уноса, их состав в пределах регенеративного устройства изменяются вследствие присосов атмосферного воздуха, утечек компонентов горения, дожигания горючих компонентов в отходящих газах, конденсации парообразного уноса и сепарация взвешенных частиц уноса.

Уравнение теплового баланса регенеративного устройства используется в расчетах тепловых схем высокотемпературных тепло-технологических установок, а также в теплотехническом расчете регенеративного устройства. В последнем случае удобнее использовать уравнение со значениями величин, которые измеряются в киловаттах. Уравнение теплового баланса устройства внешнего использования теплоты отходящих газов (УВТ) имеет следующую структуру:

$$\begin{aligned} Q'_{0.г} + Q'_{ун} + Q'_{н.г} + Q_{д.м}^{\text{УВТ}} + Q_{\text{ЭКЗ}}^{\text{УВТ}} &= \\ = Q_{д.п}^{\text{УВТ}} + Q_{\text{ЭНД}}^{\text{УВТ}} + Q_{д.о}^{\text{УВТ}} + Q_{0.с}^{\text{УВТ}} + Q''_{0.г} + Q''_{ун} + Q''_{н.г}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Здесь, как и ранее, все слагаемые предпочтительно вычислять в килоджоулях на килограмм технологического продукта, получаемого в ТР установки. Через $Q_{д.м}^{\text{УВТ}}$, $Q_{д.п}^{\text{УВТ}}$, $Q_{д.о}^{\text{УВТ}}$ в уравнении (4.25) обозначены теплота дополнительного сырья и получаемых из него в устройстве внешнего теплоиспользования дополнительного продукта и отходов; остальные обозначения в уравнении (4.25) такие же, как в уравнении (4.24), за исключением верхних индексов: индексами ' и '' обозначены количества теплоты теплоносителей до и после устройст-

ва внешнего теплоиспользования, а индексом УВТ обозначена принадлежность соответствующего слагаемого тепловому балансу устройства внешнего теплоиспользования.

Уравнение (4.25), как и (4.24), используется в расчетах тепловых схем теплотехнологических установок, а также в теплотехническом расчете устройства внешнего теплоиспользования; из него, в частности, определяют удельную производительность устройства внешнего теплоиспользования в килограммах дополнительного продукта на килограмм технологического продукта, получаемого в теплотехнологическом реакторе.

4.5. Тепловые и энергетические балансы высокотемпературной теплотехнологической установки

Уравнение теплового баланса ВТУ можно представить как сумму уравнений тепловых балансов всех элементов тепловой схемы и соединительных трубопроводов (газоходов):

$$\begin{aligned} & \sum Q_{\text{эл}}^{Ti} + \sum Q_{\text{х.т}}^i + \sum Q_{\text{ф.т}}^{i0} + \sum Q_{\text{ок}}^{i0} + \sum Q_{\text{в}}^{i0} + \sum Q_{\text{т.м}}^{i0} + \sum Q_{\text{д.м}}^{i0} + \sum Q_{j\text{экз}}^i = \\ & = Q_{\text{т.п}} + \sum Q_{\text{д.п}}^{\text{ип}} + \sum Q_{j,\text{энд}}^i + \sum Q_{\text{ш.о}}^{\text{ип}} + \sum Q_{\text{ун}}^{\text{ип}} + \sum Q_{\text{о.г}}^{\text{ип}} + \sum Q_{\text{н.г}}^{\text{ип}} + \\ & + \sum Q_{\text{в.г}}^i + \sum Q_{\text{о.с}}^i + \sum Q_{\text{о.с}}^k. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Нижние индексы у слагаемых уравнения (4.26) имеют тот же смысл, что и в рассмотренных выше уравнениях тепловых балансов ТР и других элементов тепловой схемы высокотемпературной теплотехнологической установки, за исключением двух слагаемых – $Q_{j\text{экз}}^i$, $Q_{j\text{энд}}^i$; добавочным индексом j показано, что здесь учитываются тепловые эффекты химических реакций, в которых участвуют j -е вещества технологических материалов и дополнительного сырья.

Верхними индексами обозначены: i – i -й элемент тепловой схемы; k – k -й трубопровод, газоход, по которым теплоносители переходят из одного элемента схемы в другой; $i0$ – первый по ходу движения исходного компонента i -й элемент тепловой схемы.

Если весь окислитель проходит последовательно через регенеративное устройство и автономный подогреватель и затем поступает к горелкам теплотехнологического реактора, то $\sum Q_{\text{ок}}^{i0}$ – это количество теплоты всей массы окислителя на входе в регенеративное устройство. Если же часть окислителя нагревается в регенеративном уст-

ройстве, вторая часть – в автономном подогревателе, а третья поступает непосредственно к ТР, минуя другие элементы тепловой схемы, то $\sum Q_{\text{ок}}^{i0}$ – сумма трех слагаемых: количества теплоты окислителя на входе в регенеративное устройство, на входе в автономный подогреватель и на входе в ТР; $i_{\text{п}}$ – последний по ходу движения шлаковых отходов, отходящих газов и уноса i -й элемент схемы, например, для тепловой схемы ВТУ с автономным подогревателем окислителя и устройством внешнего теплоиспользования $\sum Q_{\text{о.г}}^{i_{\text{п}}}$ – сумма двух слагаемых: теплоты отходящих газов после автономного подогревателя и после устройства внешнего теплоиспользования.

При отсутствии в тепловой схеме высокотемпературной теплотехнологической установки автономных подогревателей уравнение (4.26) может быть использовано вместо уравнения (4.6) при определении видимого удельного расхода топлива. Из сопоставления (4.6) и (4.26) следует, что при фиксированном тепловосприятии в элементах регенеративного теплоиспользования видимый расход топлива не зависит от полноты утилизации тепловых отходов теплотехнологического реактора в устройствах внешнего теплоиспользования, а приведенный расход топлива будет тем ниже, чем полнее утилизируются тепловые отходы в установках внешнего теплоиспользования.

При наличии в тепловой схеме автономных подогревателей компонентов горения из уравнения теплового баланса высокотемпературной теплотехнологической установки можно найти суммарный удельный расход топлива на высокотемпературный теплотехнологический процесс, т. е. сумму видимого удельного расхода топлива в реакторе и удельного расхода топлива в автономных подогревателях:

$$b_{\text{т.п}}^{\Sigma} = b + \sum b_{\text{а.п}}. \quad (4.27)$$

Кроме топлива, высокотемпературные теплотехнологические установки потребляют и другие энергоносители: электроэнергию, кислород, водяной пар и пр.

Электроэнергия расходуется на привод дымососа, вентилятора, газодувки, различных транспортных устройств и других механизмов. Удельный расход электроэнергии на эти цели рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_n = \frac{\sum N_i}{P}, \quad (4.28)$$

где N_i – мощность на валу электродвигателя привода i -го механизма ВТУ, кВт:

$$N_i = N_{\text{пол}i} / \eta_{\text{э}i},$$

где $N_{\text{пол}i}$ – полезная мощность i -го механизма, кВт; $\eta_{\text{э}i}$ – эксплуатационный КПД i -го механизма.

Полезная мощность рассчитывается как работа, затраченная в секунду на перемещение технологических материалов, отходящих газов, компонентов горения и т. п.; например, для дымососа:

$$N_{\text{пол}i} = V_{\text{о.г}} \cdot \Delta H_{\text{п}},$$

где $V_{\text{о.г}}$ – выход отходящих газов, м³/с; ΔH – перепад полных давлений по тракту отходящих газов, кПа.

В топливно-электрических ВТУ электроэнергия расходуется еще и как дополнительный источник теплоты, необходимой для реализации теплотехнологического процесса. Удельный расход этой энергии $Q_{\text{эл}}^T$ обычно задается параметрически; иногда его рассчитывают как долю $Q_{\text{техн}} + Q_{\text{о.с}}$ или определяют из теплового баланса той зоны теплотехнологического реактора топливно-электрической ВТУ, в которой реализуется генерация теплоты за счет электроэнергии.

Кислород расходуется как окислитель топочного или технологического процесса, его удельный расход v_k определяется из соответствующего материального расчета в кубических метрах на единицу топлива или килограмм технологического продукта.

Водяной пар потребляется в ВТУ как окислитель технологического процесса, как рабочее тело паротурбинного привода i -го механизма, как распыливающий агент (например, в мазутных форсунках). В первом случае удельный расход водяного пара $m_{\text{в.п}}$, кг/кг технологического продукта или м³/м³ технологического материала, определяется из материального расчета технологического процесса, во втором – из формулы

$$m_{\text{в.п}} = \frac{\sum m_i \cdot N_i}{P},$$

где m_i – удельный расход водяного пара на единицу мощности на валу паровой турбины – привода i -го механизма ВТУ.

В третьем – по удельным расходам распылителя и распыляемой среды (например, мазута):

$$m_{в.п} = m_p \cdot b,$$

где m_p – удельный расход пара, кг/кг мазута, принимается по эксплуатационным данным; b – удельный расход мазута на отопление ВТУ, кг/кг теплотехнического продукта.

Суммарные удельные затраты первичного топлива и приведенного первичного топлива на технологический процесс в ВТУ определяются по формулам:

$$b_{сум} = b_{т.п}^{сум} + \Delta b_{э.з}; \quad b_{сум}^{пр} = b_{сум} - \Delta b_{экон},$$

где $\Delta b_{э.з}$ – затраты первичного топлива на получение энергоносителей, потребляемых ВТУ, кг/кг теплотехнологического продукта; $\Delta b_{экон}$ – экономия топлива в замещаемой ВТУ, кг/кг теплотехнологического продукта; при отсутствии устройств внешнего теплоиспользования $\Delta b_{экон} = 0$.

Литература

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / под ред. А. Д. Ключникова. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 389 с.
2. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / под ред. А. П. Лисиенко. – Минск : Высш. шк., 1988. – 412 с.
3. Тимошпольский, В. И. Промышленные теплотехнологии : в 5 кн. / В. И. Тимошпольский, А. П. Несенчук, И. А. Трусова. – Минск : Выш. шк., 1998. – Кн. 3. – 422 с.
4. Зобнин, Б. Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев. – Москва : Металлургия, 1982. – 360 с.
5. Василькова, С. Б. Справочник. Расчет нагревательных и термических печей / С. Б. Василькова, М. М. Генкина, В. Л. Гусовский. – Москва : Металлургия, 1983. – 480 с.
6. Аверин, С. И. Расчет нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов ; под ред. Н. Ю. Тайца. – Киев : Техника, 1969. – 539 с.
7. Мастрюков, Б. С. Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б. С. Мастрюков. – Москва : Машиностроение, 1979. – 368 с.
8. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник : в 4 кн. / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – Кн. 4. – 588 с.

Содержание

Введение.....	3
1. Теплотехническая классификация высокотемпературных теплотехнологических процессов.....	4
2. Классификация реакторов и источников энергии высокотемпературных теплотехнологических установок.....	9
3. Тепловые схемы высокотемпературных технологических установок с топливным источником энергии.....	13
4. Материальные, тепловые и энергетические балансы.....	16
4.1. Структура уравнений материальных балансов.....	16
4.2. Расчеты материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических процессов.....	19
4.3. Тепловой баланс теплотехнологического реактора.....	20
4.4. Зональные тепловые балансы теплотехнологического реактора. Тепловые балансы отдельных элементов тепловой схемы высокотемпературной теплотехнологической установки.....	28
4.5. Тепловые и энергетические балансы высокотемпературной теплотехнологической установки.....	34
Литература.....	38

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Вальченко Николай Адамович

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И УСТАНОВКИ**

Пособие

**по одноименному курсу
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика»**

Электронный аналог печатного издания

Редактор

С. Н. Санько

Компьютерная верстка

Н. Б. Козловская

Подписано в печать 15.04.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,23.

Изд. № 138.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:

Издательский центр учреждения образования

«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.