

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»**  
**Высшая школа технологии и энергетики**  
**Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей**

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАЛАНСЫ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**  
Часть 2 «Энергетические балансы промышленных предприятий»

Текст лекций для студентов всех форм обучения  
по направлению подготовки:  
13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составитель В.В. Нечитайлов

Санкт-Петербург  
2021

Утверждено  
на заседании кафедры ТСУ и ТД  
15.04.2021 г., протокол № 2

Рецензенты  
В.Ф. Горшков, С.Н. Смородин

Текст лекций соответствует программам и учебным планам дисциплины «Теплоэнергетические системы и энергетические балансы промышленных предприятий» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Текст лекций включает вторую часть материалов по дисциплине. Рассмотрены рациональная организация теплоэнергетических систем и построение энергетических балансов промышленных предприятий. Издание предназначено для самостоятельной работы студентов.

Текст лекций предназначен для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве текстов лекций.

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.  
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 01.06.2021 г. Рег.№ 25/21

**Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Лекция 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАЛАНСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА .....	5
1.1. Основные понятия и определения энергетического баланса .....	5
1.2. Построение энергетических балансов промышленного предприятия .....	9
1.2.1. Материальные балансы .....	9
1.2.2. Энергетические балансы .....	10
1.2.3. Эксергетические балансы .....	11
1.2.4. Энергетические балансы промышленного предприятия .....	16
1.3. Методы анализа энергетического баланса и критерии эффективности энергопотребления на промышленных предприятиях.....	16
1.4. Анализ эффективности энергоиспользования в элементах оборудования и системах промышленного предприятия.....	21
1.4.1. Анализ термодинамической эффективности элементов оборудования теплоэнергетических систем.....	21
Контрольные вопросы к лекции 1 .....	29
Лекция 2. МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ ДИСБАЛАНСОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....	31
2.1. Причины возникновения дисбалансов прихода и расхода энергоносителей на промышленных предприятиях.....	31
2.2. Тепловое аккумулирование энергоносителей.....	33
2.3. Резервирование мощности теплогенераторов.....	42
2.4. Использование пиковых источников энергоресурсов.....	43
Контрольные вопросы к лекции 2 .....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	48

## **ВВЕДЕНИЕ**

Вторая часть текста лекций соответствует программам и учебным планам дисциплины «Теплоэнергетические системы и энергетические балансы промышленных предприятий» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

В материалах лекций рассмотрены рациональная организация теплоэнергетических систем, виды энергетических балансов на современных промышленных предприятий и построение энергетических балансов промышленных предприятий.

Представлены методы анализа энергетического баланса и критерии эффективности энергопотребления на промышленных предприятиях. Произведены анализ эффективности энергоиспользования в элементах оборудования и системах промышленного предприятия и анализ термодинамической эффективности элементов оборудования теплоэнергетических систем.

Выявлены причины возникновения дисбалансов и методы их устранения в теплоэнергетических системах промышленных предприятий.

# Лекция 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАЛАНСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

## 1.1. Основные понятия и определения энергетического баланса

Расхождения в трактовке понятий энергетического баланса часто приводят к трудностям восприятия методик и результатов исследований в этой области. Поэтому в расчетно-пояснительных записках и логических построениях следует придерживаться терминологии, рекомендованной Научным советом по комплексным проблемам энергетики Российской академии наук [1].

Все виды энергоносителей, которые используются в настоящее время в промышленности, являются природными ресурсами — это нефть, уголь, природный газ, уран, горячие источники и пр. Прежде чем попасть к потребителю, природные ресурсы проходят стадии, среди которых выделяются [2]:

- добыча — извлечение природного энергетического ресурса (ЭР);
- облагораживание — обогащение без изменения его физико-химической основы (удаление из угля пустой породы);
- переработка — получение ЭР иной физико-химической основы, но без изменения его агрегатного состояния (например, разделение нефти на фракции);
- преобразование — получение ЭР измененной физико-химической основы и агрегатного состояния (например, газификация твердого топлива);
- хранение — создание запаса ЭР или хранение ЭР в целях сглаживания неравномерности их потребления;
- транспорт и распределение;
- конечное использование — использование ЭР на неэнергетические производственные нужды, для обеспечения работы транспорта, а также на восполнение затрат ЭР на собственные нужды энергетических установок, объектов и систем. Различают конечное использование брутто, когда затраты ЭР на собственные нужды не выделяются, и нетто, когда выделяются

затраты ЭР на собственные нужды каждой стадии в отдельности;

— получение побочных (вторичных) ЭР, т.е. продукта промышленного производства, который в дальнейшем может быть использован в качестве ЭР.

Устройства, посредством которых осуществляется воздействие на ЭР при прохождении перечисленных выше стадий, называются энергетическими установками. Совокупность таких установок, объединенных территориально для совместного выполнения производственно-технических задач, представляет собой энергетический объект.

Энергетическое хозяйство промышленного предприятия или территориального объединения — это сложный комплекс взаимосвязанных энергетических установок и объектов.

Различают энергетическое и неэнергетическое использование ЭР. Например, природные углеводороды могут быть использованы в качестве топлива (энергетическое использование) и в качестве сырья для технологического производства (неэнергетическое использование).

По определению, энергетическое использование ЭР — это потребление ресурса энергетическими установками в энергетических процессах. Выделяют целевые направления использования ЭР:

- силовые процессы (двигательные и непосредственного воздействия, например, сжатие газов);
- тепловые процессы: высоко-, средне- и низкотемпературные (отопление, горячее водоснабжение, кондиционирование воздуха);
- освещение;
- средства связи и управления;
- электрохимические и электрофизические процессы.

Неэнергетическое использование ЭР — это использование ресурсов в качестве сырья или материалов [1].

Возможно комплексное и комбинированное использование ЭР, когда один и тот же ресурс может использоваться в качестве ЭР и в качестве сырья, а также для получения нескольких видов энергии (например, на ТЭЦ за счет перегретого

водяного пара высокого или среднего давления отпускаются одновременно тепловая и электрическая энергия).

Движение ЭР от производителей к потребителям ресурсов называется энергетическим потоком.

Энергетический баланс — это полное количественное соответствие (равенство) между суммарной подведенной энергией и суммарной полезной энергией и потерями. Энергетический баланс характеризует эффективность использования энергии в энергетическом хозяйстве страны или его отдельных участках — районах, отраслях, предприятиях, установках, процессах.

Подведенная энергия — количество энергии всех ЭР, подведенное к энергетической установке или энергетическому объекту. Фактически это приходная часть энергетического баланса, а именно: текущие остатки ЭР, добыча или производство ЭР, поступление ЭР от внешних источников.

Полезная энергия — количество энергии, теоретически необходимое для осуществления тех или иных энергетических процессов, а также получаемое количество ЭР на стадиях переработки и преобразования. В настоящее время нет однозначного количественного определения полезной энергии, поэтому в расчетах следует руководствоваться целевыми характеристиками реализуемых процессов. В частности, при рассмотрении тепловых процессов полезной энергией является количество воспринятой тепловой энергии.

Потребление энергоносителей на собственные нужды — расход ЭР на вспомогательные энергетические и технологические цели.

Потери энергии представляют собой разность между подведенной и полезной энергией. Они классифицируются следующим образом:

1. По возможности и целесообразности устранения: полные потери; потери, устранение которых в данных условиях технически осуществимо; потери, устранение которых экономически целесообразно.

2. По месту возникновения — в зависимости от стадии: добыча, транспорт, хранение, преобразование и т.п.

3. По физическому признаку и характеру: потери теплоты с уходящими

газами, излучение в окружающую среду и пр.; потери электроэнергии в линиях электропередачи и пр.; гидравлические потери на трение при движении жидкости, дросселирование и пр.; утечки через неплотности, усушка, утруска; механические потери на трение.

4. По причинам возникновения: из-за неверно организованного режима работы, неправильной эксплуатации агрегатов и т.п.

Энергетические балансы промышленных предприятий разделяются на фактические и аналитические.

Фактический баланс отражает существующее положение энергоиспользования на предприятии.

Аналитические балансы подразделяют на несколько видов:

Аналитический проектный (нормализованный) — отражает энергоиспользование при условии устранения необоснованных потерь, обусловленных низким уровнем эксплуатации. Потери, заложенные в проекте или в технологическом эксплуатационном регламенте, остаются неизменными.

Аналитический проектный приведенный (обобщенный) — это баланс, в котором все виды потребляемой энергии и энергоносителей приводятся к единому эквиваленту — условному топливу.

Аналитический проектный рационализированный — разрабатывается с учетом некоторых энергосберегающих мероприятий, которые не изменяют принципиальные основы технологических процессов.

Аналитический проектный оптимальный — учитывает замену существующих технологических процессов принципиально новыми, основанными на эффективных энергосберегающих разработках последних лет.

Кроме вышеперечисленных энергетических балансов, существуют частные, имеющие определенное целевое назначение:

материальный — для анализа распределения материальных потоков;

тепловой — для анализа эффективности использования тепловой энергии;

эксергетический — для анализа термодинамической эффективности использования энергии, при помощи которого оценивается не только ко-



личественная сторона энергетического баланса, но и его «качественная» сторона [1].

## 1.2. Построение энергетических балансов промышленного предприятия

Для проведения аналитических исследований действующего предприятия исходными являются материальные, энергетические и эксергетические балансы, а также все необходимые данные для их построения: теплофизические характеристики, зависимость выхода продукта от изменения параметров технологического процесса и пр.

### 1.2.1. Материальные балансы

В основе уравнений материальных балансов, характеризующих деятельность рассматриваемого объекта (промышленного комплекса, подразделения; установки и т.п.), лежит закон сохранения и превращения материи [3, 4]. Построение материальных балансов технологических объектов химических и нефтехимических предприятий требует учета материальных потоков образующихся побочных и возвратных продуктов производства:

$$\sum_i G_i = \sum_j G_j + \sum_i G_i^{\text{воз}} + \sum_i G_i^{\text{пот}} + \sum_k G_k^{\text{поб}} + \sum_l G_l^{\text{отх}}, \quad (1.1)$$

где  $G_i$  — расход  $i$ -го компонента, введенного в объект, кг/с;

$G_j$  — объем (мас.) полученного в объекте  $j$ -го целевого продукта производства, кг/с;

$G_i^{\text{воз}}$  — объем возвратного  $i$ -го компонента, кг/с;

$G_i^{\text{пот}}$  — потери  $i$ -го компонента, кг/с;

$G_k^{\text{поб}}$  — объем (мас.) образовавшегося в объекте  $k$ -го побочного продукта, кг/с;

$G_l^{\text{отх}}$  — объем (мас.) образовавшихся отходов производства, не находящихся применения на смежных стадиях и у внешних потребителей, кг/с.

Показателем эффективности деятельности предприятия является коэффициент безотходности производства  $\beta_m$ , отражающий соотношение полезно затраченных материальных ресурсов к введенным в систему:

$$\beta_M = \frac{\sum_j G_j + \sum_i G_i^{воз} + \sum_k G_k^{поб}}{\sum_i G_i} = \frac{\sum_i G_i - (\sum_k G_k^{поб} + \sum_l G_l^{отх})}{\sum_i G_i}, \quad (1.2)$$

где  $\sum_j G_j + \sum_i G_i^{воз} + \sum_k G_k^{поб}$  — доля полезно затраченных ресурсов при условии, что побочные продукты полностью используются потребителем (внутренним или внешним), кг/с;

$\sum_k G_k^{поб} + \sum_l G_l^{отх}$  — потери материальных ресурсов, кг/с.

### 1.2.2. Энергетические балансы

В основе уравнений энергетических балансов и их частных случаев (тепловых, гидравлических, по энергоносителю определенного вида), характеризующих деятельность рассматриваемого объекта, лежит закон сохранения и преобразования энергии.

В общем случае уравнение энергетического баланса промышленного объекта имеет вид

$$\sum_i Q_i = \sum_i Q_i^{пол} + \sum_i Q_i^{пот} + \sum_j Q_j, \quad (1.3)$$

где  $Q_i$  — подведенный к объекту энергоноситель  $i$ -го вида, кВт;

$Q_i^{пот}$  — потери энергоносителя  $i$ -го вида в технологическом процессе рассматриваемого объекта, кВт;

$Q_i^{пол}$  — полезное использование энергоносителя  $i$ -го вида, кВт;

$Q_j$  — образовавшийся в объекте энергоноситель  $j$ -го типа (в том числе и ВЭР, находящий применение на смежных стадиях производства или у внешних потребителей), кВт.

В качестве основного показателя эффективности энергоиспользования обычно используется энергетический (в тепловых процессах — тепловой) КПД

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{подв}} = \frac{\sum_i Q_i^{пол} + \sum_j Q_j}{\sum_i Q_i} = \frac{\sum_i Q_i - \sum_i Q_i^{пот}}{\sum_i Q_i}. \quad (1.4)$$

На ПП существует зависимость материальных и тепловых потоков, так как в них основными технологическими являются массообменные процессы. Выход конечного продукта непосредственно зависит от режима ведения процесса, определяемого поддерживаемыми температурой и давлением, а изменение расходных характеристик, в свою очередь, влияет на структуру энергетического ба-

ланса объекта исследования. Возникает параметрическое возмущение, которое может захватывать большое количество разнотипных элементов оборудования. Моделирование этой ситуации возможно только с учетом структурной организации промышленного объекта [1].

### *1.2.3. Эксергетические балансы*

Исследование термодинамического совершенства промышленных и энергетических систем является сложной задачей, и для ее решения используются материальные, энергетические и эксергетические балансы [1].

Термодинамический анализ объектов целесообразно проводить при наличии двух признаков [5, 6]:

1. В структуре энергетического баланса объекта значительную долю имеют процессы превращения энергии, для исследования которых следует применять второй закон термодинамики.

2. Объект находится в условиях контакта с равновесной окружающей средой, параметры которой не зависят от данного объекта.

Эти признаки также учитывают при рассмотрении двух видов технических систем — энергетических и технологических. К энергетическим объектам исследования относятся элементы оборудования, процессы, системы производства, преобразования и распределения энергии. В их число входят как источники и крупные преобразователи энергии — ТЭС, КЭС, ТЭЦ, котельные, компрессорные станции, холодильные и криогенные системы и т.п., так и ее потребители.

К технологическим системам относятся элементы оборудования, процессы, системы производства, преобразования и распределения вещества, промышленные объекты, в производственных схемах которых реализуются данные процессы.

Иногда под объектами исследования понимают процессы и системы, в которых существенную роль играют тепловые процессы, что значительно сужает область применения эксергетического анализа и вносит погрешности в вычисления.

Механические, электрические и электромеханические системы не явля-

ются объектами исследования термодинамического анализа, если в них не значительны диссипативные процессы (выделение тепловой энергии). Кроме того, в процессах, в которых передаваемая энергия близка к химической эксергии (выделение энергии при разложении сложных веществ на простейшие), дальнейший анализ не может дать сколько-нибудь существенных результатов. К ним, в частности, относятся процессы горения в высокотемпературных установках [1].

Составляющими термодинамического анализа являются:

- анализ объектов в целях определения «узких» мест с наибольшей необратимостью процессов и выявления перспективных направлений и пределов повышения их термодинамической эффективности;
- качественная оценка технического уровня организации систем по массовым, энергетическим и термодинамическим характеристикам и синтез новых систем и элементов оборудования;
- комплексная качественная оценка энергетических ресурсов;
- термодинамическая оптимизация систем на различных уровнях структурной организации.

В настоящее время разработана единая методика термодинамического анализа — эксергетический метод [7-9], так как энергетические и технологические объекты не только неразрывно связаны между собой, но и имеют однотипное оборудование (теплообменники, компрессоры, высокотемпературные установки и пр.).

Исходным уравнением для расчета потоков эксергии является эксергетический вектор Умова — Пойнтинга, объединяющий компоненты эксергии [10]:

$$\vec{\delta}_e = \vec{\delta}_e^M + \vec{\delta}_e^O + \vec{\delta}_e^W, \quad (1.5)$$

т.е. суммы потоков эксергии с материальными телами, теплотой и механической (или электромагнитной) мощностью.

Для анализа термодинамической эффективности энергетических систем и теплотехнологии промышленных производств существенное значение имеют тепловой компонент эксергетического вектора и расходные характеристики. В технологических объектах в потоке вещества может выделяться химическая

эксергия, которую необходимо учитывать при анализе массообменных процессов и превращениях вещества в реакторах [1].

Методика составления эксергетического баланса и его последующего анализа базируется на многочисленных исследованиях [5, 8]. Порядок проведения эксергетического анализа теплоэнергетической эффективности теплотехнологических процессов включает в себя несколько этапов.

**Этап 1.** Определяются условия проведения технологического процесса и принимаются параметры, необходимые для построения эксергетических функций: параметры окружающей среды, ограничения и допущения, а также составляется балансовая теплотехнологическая схема анализируемой системы (БТТС). На БТТС наносятся все элементы технологической схемы, в которых происходит существенное изменение термодинамических параметров потоков теплоты и вещества.

От правильного выбора параметров окружающей среды непосредственно зависят результаты проведения термодинамического анализа. Как отмечается в [5, 7], при расчете эксергетических температурных функций это влияние оказывается весьма значительным. Рекомендуется выбирать параметры окружающей среды по средним значениям.

Для систем теплоснабжения в качестве уровня отсчета следует выбирать параметры окружающей среды, соответствующие максимальному режиму в зимнее время. В этом случае при определении термодинамических характеристик объекта необходимо учитывать эксергетические потери, связанные с замерзанием потоков вещества.

Для систем хладоснабжения, осуществляющих передачу теплоты при температурах ниже температуры окружающей среды, напротив, наиболее напряженный период наблюдается в июле.

В теплотехнологии ПП нагрузки систем тепло- и хладоснабжения соизмеримы, поэтому представляется целесообразным выбирать параметры окружающей среды, близкие к расчетным среднегодовым.

**Этап 2.** Определяются действительные термодинамические параметры рассматриваемых потоков на входе и выходе элементов (или составляются си-

стемы дифференциальных уравнений для анализа эффективности процессов, происходящих в рабочих областях оборудования) на основе построенных материальных и тепловых балансов [1].

**Этап 3.** Определяются значения эксергии на входе и выходе элементов, составляется эксергетический баланс, вычисляются потери эксергии для отдельных элементов и системы в целом. Эксергетический баланс для стационарного процесса имеет вид

$$\sum_i E_i^{\text{подв}} = \sum_i E_i^{\text{пол}} + \sum_i E_i^{\text{пот}}, \quad (1.6)$$

где  $E_i^{\text{подв}}$  — подведенная к объекту эксергия с  $i$ -м потоком, кВт;

$E_i^{\text{пол}}$  — полезно воспринятая в объекте эксергия  $i$ -го потока, кВт;

$E_i^{\text{пот}}$  — потери эксергии  $i$ -го потока в ходе проведения технологического процесса в рассматриваемом объекте, кВт.

Эксергия однородного вещества определяется из соотношения

$$\Delta_{oe} = h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0). \quad (1.7)$$

Если рабочее вещество рассматривать как идеальную смесь, то эксергию вещества можно определять

$$\Delta_0 e_0 = e_{\text{см.ф}} + e_0. \quad (1.8)$$

Для расчета эксергии теплового потока используется выражение

$$E_q = \tau_e Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q, \quad (1.9)$$

где  $\tau_e Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$  — эксергетическая температурная функция.

Изменение эксергии при осуществлении химических превращений в элементах системы определяется разностью значений термомеханической эксергии на входе и выходе элемента за вычетом потерь эксергии, связанных с внешним охлаждением ограждающих конструкций. При определении химической эксергии топливного газа, сжигаемого в высокотемпературных технологических установках и агрегатах энергетического назначения, используется методика, предложенная Шаргутом и Стырильской [8]. Ими составлены корреляционные зависимости, отражающие взаимосвязь между нормальной химической

эксергией, теплотой сгорания и числами, характеризующими химический состав исходного топлива по компонентам H/C; O/C; W/C; S/C.

На основе этих зависимостей предложены приближенные формулы для расчета нормальной химической эксергии вещества технического топлива. В частности, для газообразных углеводородов ее значение определяется соотношением

$$\frac{e_n}{Q_H^P} = 1,0344 + 0,0183 \frac{H}{C} - 0,0694 \frac{1}{C}, \quad (1.10)$$

где  $\frac{H}{C}$  — отношение атомного числа водорода к атомному числу углерода;

$Q_H^P$  — расчетная низшая теплота сгорания топлива;

$e_n$  — нормальная химическая эксергия природного газа.

$$e_0 = 1,04 Q_H^P. \quad (1.11)$$

**Этап 4.** В целях наглядного изображения энергетических и эксергетических балансов установки составляются диаграммы потоков энергии и эксергии, а также таблицы, содержащие расчетные данные. Диаграммы потоков энергии позволяют наглядно представить энергобалансы, составленные в соответствии с первым законом термодинамики.

Диаграммы потоков эксергии позволяют судить о термодинамическом совершенстве преобразований в соответствии со вторым законом термодинамики и оценить потери. Такие диаграммы являются универсальными, и их можно использовать для анализа потоков эксергии. По ним можно быстро установить, в каких элементах установки имеют место необратимые потери и где именно необходимо провести усовершенствование [1].

**Этап 5.** Оценивается степень совершенства теплотехнологических процессов. Для этого может использоваться эксергетический КПД, определяемый для каждого элемента и системы в целом, например при помощи соотношения

$$\eta_e = \frac{\sum E_i^{\text{пол}}}{\sum E_i^{\text{подв}}} = \frac{\sum E_i^{\text{подв}} - \sum E_i^{\text{пот}}}{\sum E_i^{\text{подв}}}. \quad (1.12)$$

Недостатком такого метода оценки эффективности является то, что

не выделяются транзитные потоки эксергии (потоки эксергии, которые циркулируют в системе и практически не изменяются). Если таковые имеются, то они входят в числитель и знаменатель отношения (1.12). В результате возникает отклонение расчетного эксергетического КПД от его действительного значения.

**Этап 6.** Заключительный этап, на котором проводится оценка полученных результатов и формулируются выводы.

#### ***1.2.4. Энергетические балансы промышленного предприятия***

При составлении энергетического баланса необходимо соблюдать следующие требования:

1. Баланс должен обеспечивать возможность контроля энергоиспользования на всех участках производства, а также в основном технологическом оборудовании.

2. Баланс должен быть оформлен так, чтобы можно было судить об эффективности энергоиспользования по предприятию в целом.

3. Баланс должен отражать целевое назначение энергии: в нем должны быть выделены расходы ЭР на силовое оборудование, технологические и хозяйственно-бытовые нужды.

4. Баланс должен отражать качественную сторону потребляемых ЭР, в частности, следует указывать сорт, марку, зольность и влажность топлива, давление и температуру тепловых ЭР и пр.

5. Энергетический баланс должен отражать внутренний оборот ЭР различного вида и параметров и быть связанным с материальными и прочими частными балансами.

### **1.3. Методы анализа энергетического баланса и критерии эффективности энергопотребления на промышленных предприятиях**

Основным критерием оценки эффективности использования энергии является КПД, который в общем виде задается вышеприведенным соотношением (1.4). Для оценки эффективности использования тепловой энергии в каком-ли-



бо элементе оборудования, например теплообменнике или печи, применяется тепловой КПД

$$\eta_T = \frac{H_1 - H_2 - Q_{\text{пот}}}{H_1}, \quad (1.13)$$

где  $H_1, H_2$  — соответственно полная энтальпия теплового потока на входе и выходе элемента, кДж;

$Q_{\text{пот}}$  — потери теплоты в процессе теплопередачи, кДж.

В комплексных теплоутилизационных системах используются потоки с разными теплофизическими параметрами. Для оценки таких потоков вводят коэффициент эффективности теплообмена Кейса— Лондона [11]

$$\varepsilon = \frac{W_T(t_{T1} - t_{T2})}{W_{\min}(t_{T1} - t_{X2})} = \frac{W_X(t_{X2} - t_{X1})}{W_{\min}(t_{T1} - t_{X2})}, \quad (1.14)$$

где  $W_T, W_X$  — водяные эквиваленты горячего (греющего) и холодного (нагреваемого) потока соответственно, Вт/К (здесь водяной эквивалент представляет собой произведение расхода на удельную теплоемкость вещества, т.е.  $W = G \cdot C_p$ );

$W_{\min}$  — минимальное значение водяного эквивалента, определенное при сравнении  $W_T$  и  $W_X$ , Вт/К;

$t_{T1}, t_{T2}$  — температура горячего потока на входе и выходе теплообменника, °С;

$t_{X2}, t_{X1}$  — температура холодного потока на входе и выходе теплообменника, °С.

Основным критерием термодинамической эффективности использования энергии является эксергетический КПД, который может быть рассчитан по (1.12). Однако существуют и другие, более точные методы оценки, например разностный метод [5].

Здесь уменьшение подводимой эксергии  $i$ -го потока обозначается  $\nabla E_i^{\text{подв}}$  — «затраты», а возрастание полезно воспринятой эксергии —  $\Delta E_i^{\text{пол}}$  — «полезные эффекты». В этом случае отношение для расчета эксергетического КПД имеет вид:

$$\eta_e = \frac{\sum \Delta E_i^{\text{пол}}}{\sum \nabla E_i^{\text{подв}}}, \quad (1.15)$$

Такой подход при расчете эксергетического КПД позволяет более каче-

ственно отразить степень реализации поставленной задачи, чем в предыдущем случае. Однако при расчете КПД многоэлементных систем возникает неоднозначность при выборе факторов, которые можно отнести к «полезным эффектам» или «затратам». Для этого необходимо приводить специальное обоснование.

В другом методе расчета эксергетического КПД вычитают из числителя и знаменателя уравнения (1.12) потоки эксергии, не претерпевшие в системе качественных изменений (транзитные потоки)

$$\eta_e = \frac{\sum_i^{\text{пол}} E - \sum_j^{\text{ТР}} E}{\sum_i^{\text{подв}} E - \sum_j^{\text{ТР}} E} = \frac{\sum_i^{\text{подв}} E - \sum_i^{\text{пот}} E - \sum_j^{\text{ТР}} E}{\sum_i^{\text{подв}} E - \sum_j^{\text{ТР}} E}, \quad (1.16)$$

где  $\sum_j^{\text{ТР}} E$  — транзитная эксергия  $j$ -го потока вещества, проходящая через рассматриваемую систему.

Понятие транзитной эксергии позволяет выделить и оценить полезные преобразования. Однако сделать это для многоконтурной и многоэлементной системы достаточно сложно. В качестве транзитной эксергии потока обычно принимаются минимальные ее значения на входе и выходе системы.

Кроме оценки теплоэнергетической эффективности по эксергетическим КПД, целесообразно включить в методику проведения эксергетического анализа сложных систем эксергетический коэффициент полезного использования теплоты (КПИ). Выражение для определения КПИ имеет такой же вид, что и (1.15). Отличие состоит в методе определения «полезного эффекта». В соответствии с целями проводимого эксергетического анализа теплотехнологиии теплоэнергетических систем промышленного предприятия используют следующий метод для определения «полезного эффекта».

Если эксергия, затраченная в каком-либо элементе системы, используется в осуществлении основного технологического процесса или получении дополнительного количества энергии для собственных нужд производства и внешних потребителей, то величина, принятая за «полезный эффект» при определении КПД по (1.15), включается в уравнение баланса в качестве КПИ.

Если же эксергия, отводимая от элемента, например, в процессах охлаждения, не находит применения в технологических и энергетических системах

предприятия, ее доля, принятая за «полезный эффект» при определении КПД по (1.16), в баланс КПИ не включается.

Таким образом, КПИ показывает, насколько эффективно используется эксергия, затраченная в элементах системы, для осуществления технологических процессов, покрытия внутренних тепловых нагрузок и нагрузок внешних потребителей теплоты. Реальный КПИ всегда меньше КПД. Лучшим является вариант, когда вся подведенная в элементах системы эксергия, за исключением потерь в окружающую среду и необратимых потерь, используется полезно, т.е. когда КПИ равен КПД [1].

Критерии эффективности использования энергии, рассчитываемые на основе информации сводных и частных энергетических балансов промышленных предприятий, в которых приходится разносить использование топлива по различным статьям, определяются другими методами.

В настоящее время в энергетике принят балансовый метод разнесения энергетических затрат. Расход топлива, т/год, на отпуск теплоты из отборов турбин ТЭЦ определяется [2]

$$B_T = \frac{0,6 \cdot Q_T}{\eta_k^{\text{бр}} \eta_T}, \quad (1.17)$$

где  $Q_T$  — годовой отпуск теплоты из отборов турбин ТЭЦ, ГДж/год;

$\eta_k^{\text{бр}}$  — КПД брутто котельной ТЭЦ;

$\eta_T$  — КПД теплового потока.

Расход топлива, т/год, на производство сжатого воздуха, производимого в турбовоздуховках для парогенераторов ТЭЦ, принимается

$$B_{\text{с.в}} = \frac{0,6 \cdot Q_{\text{с.в}}}{\eta_k^{\text{бр}}}, \quad (1.18)$$

где  $Q_{\text{с.в}}$  — годовое потребление теплоты турбовоздуховкой на сжатие воздуха, ГДж/год.

Расход топлива, т/год, на выработку электроэнергии определяется разностью между общим расходом топлива на ТЭЦ  $B_{\text{тэц}}$  и суммой расходов топлива на отпуск теплоты и производство сжатого воздуха

$$B_{\text{э}} = B_{\text{тэц}} - (B_m + B_{\text{с.в.}}). \quad (1.19)$$

Коэффициент полезного использования энергии для анализа сводных балансов представляется в виде

$$\eta_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} k_i \eta_{ij}}{B_1}, \quad (1.20)$$

где  $i$  — виды энергоносителей, используемых на предприятии,  $i = 1, m$ ;

$j$  — виды энергетических процессов, составляющих целевые расходы топлива и энергии,  $j = 1, n$ ;

$B_{ij}$  — годовой расход энергоносителя  $i$  в процессе  $j$ , т/год;

$k_i$  — коэффициент приведения энергоносителя  $i$ ;

$\eta_{ij}$  — КПД процесса  $j$  при работе на энергоносителе  $i$ ;

$B_1$  — суммарное годовое использование на предприятии всех видов ЭР.

Существует и другой показатель КПИ, который учитывает эффективность использования только подведенных ЭР, исключая стадии преобразования топлива и энергии:

$$\eta_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n'} B_{ij} k_i \eta_{ij}}{B_2}, \quad (1.21)$$

где  $m'$  — виды энергоносителей, поступающих конечному потребителю;

$n'$  — виды энергетических процессов, составляющих группу конечного потребления;

$B_2$  — суммарное количество потребленных ЭР, подведенных к предприятию в течение года, т/год.

Этот показатель можно представить разностью между потребностью и внутренним производством ЭР (за счет использования ВЭР и от собственных источников энергии)

$$B_2 = \sum_{i=1}^m s_i \left[ \sum_{j=1}^n \left( B_{0ij} - B_{i'j} \frac{\eta_{i'j}}{\eta_{ij}} \right) - B_i + \Delta B_{\text{пот}i} \right], \quad (1.22)$$

где  $i'$  — виды ВЭР, образующихся на предприятии,  $i' = 1, m'$ ;

$B_{0ij}$  — потребность процесса  $j$  в энергоносителе вида  $i$ , т/год;

$B_{i'j}$  — количество использованных в процессе  $j$  ВЭР вида  $i'$  вместо ЭР вида  $i$ , т/год;

$\eta_{i'j}$  — КПД процесса  $j$  при работе на ВЭР вида  $i'$ ;

$B_i$  — собственное производство ЭР вида  $i$  на основных генерирующих источниках (не утилизаторах), т/год;

$\Delta B_{\text{пот}i}$  — потери ЭР вида  $i$  на внутривозовских коммуникациях, т/год;

$S_i$  — коэффициент приведения различных энергоносителей к природным ЭР

$$S_i = \frac{k_i}{\eta_1^\Sigma}, \quad (1.23)$$

где  $\eta_1^\Sigma$  — суммарный приведенный КПД цепочки энергоснабжения при работе на ЭР вида  $i$  (см. 1.24).

Таким образом определяется эффективность использования ВЭР на предприятиях, имеющих на своей территории собственные источники энергоресурсов (котельные, ТЭЦ), а также утилизаторы ВЭР, промышленные технологии [1].

#### 1.4. Анализ эффективности энергоиспользования в элементах оборудования и системах промышленного предприятия

В этом разделе приводятся примеры проведения анализа энергетической и термодинамической эффективности некоторых из элементов оборудования теплоэнергетических систем.

##### 1.4.1. Анализ термодинамической эффективности элементов оборудования теплоэнергетических систем

**1. Паротурбинная установка.** Расширение пара в турбине (рис. 1.1) осуществляется без теплообмена с окружающей средой, но при этом происходят потери на трение при движении рабочей среды, что вызывает соответствующие потери эксергии  $\Sigma D$ . Уравнение эксергетического баланса паротурбинной установки имеет вид [5]

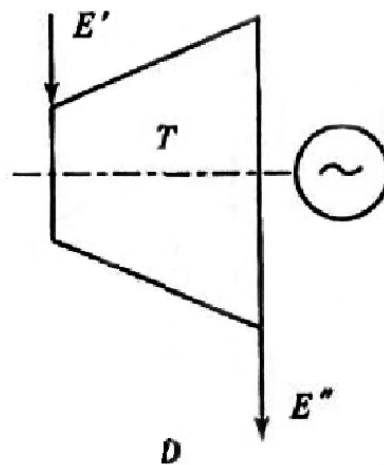


Рис. 1.1. Схема паротурбинной установки к построению эксергетического баланса

$$E' = E'' + L + \sum D, \quad (1.24)$$

где  $E'$  и  $E''$  — эксергия рабочего потока на входе и выходе турбины;

$L$  — внутренняя работа пара в турбине.

Эксергетический КПД турбины определяется соотношением

$$\eta_e = \frac{E'' + L}{E'} = 1 - \frac{\sum D}{E'}. \quad (1.25)$$

Иногда в турбинах осуществляется промежуточный перегрев, когда из одной из ступеней расширения отводится пар, нагревается до нужной температуры в теплообменнике и направляется на следующую ступень расширения (рис. 1.2).

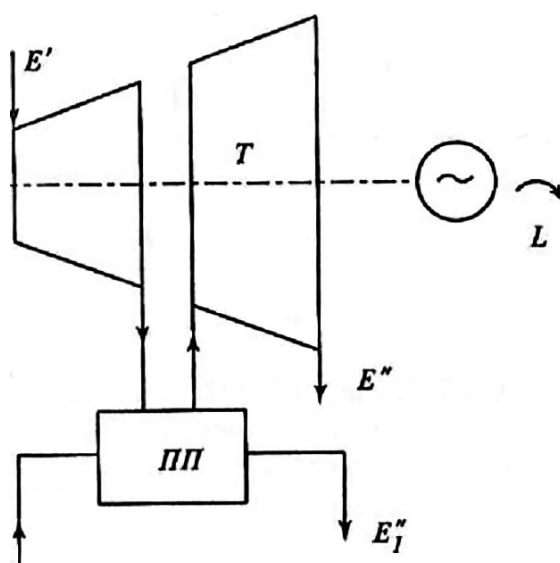


Рис. 1.2. Схема паротурбинной установки с промежуточным перегревом для построения эксергетического баланса: Т — турбина, ПП — промежуточный пароперегреватель

В этом случае (1.24) преобразуется к виду

$$E' + E'_1 = E'' + L + E''_1 + \sum D, \quad (1.26)$$

где  $E'_1$  и  $E''_1$  — эксергия потока пара на входе и выходе промежуточного теплообменника;

$\sum D$  — суммарные потери эксергии с учетом потерь вследствие необратимости процесса теплопередачи в теплообменнике.

Выражение для расчета эксергетического КПД изменится

$$\eta_e = \frac{E'' + E'_1 + L}{E' + E'_1} = 1 - \frac{\sum D}{E' + E'_1}. \quad (1.27)$$

Количество полезно использованной эксергии в системе увеличивается, но увеличиваются также подведенная эксергия и ее потеря.

**2. Компрессор.** В компрессорных установках осуществляется сжатие газообразной рабочей среды за счет совершения работы  $L$  (рис. 1.3). Эксергетический баланс установки выражается соотношением [5]

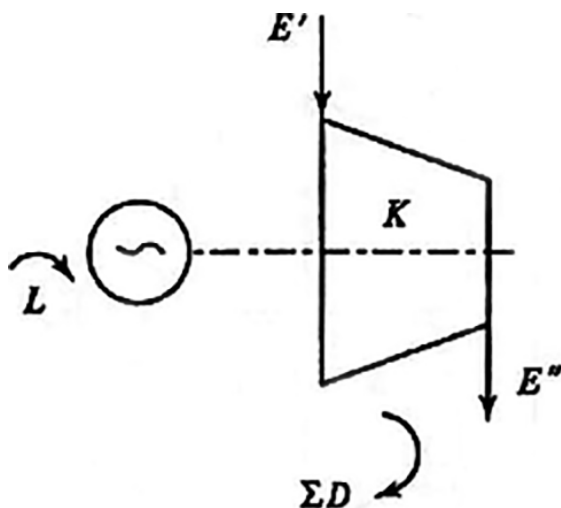


Рис. 1.3. Расчетная схема для построения эксергетического баланса компрессора:  
К — компрессор

$$L + E' = E'' + \Sigma D, \quad (1.28)$$

где  $E'$  и  $E''$  — эксергия потока газа на входе и выходе компрессора;  
 $\Sigma D$  — потери эксергии в процессе сжатия.

Эксергетический КПД компрессора определяется соотношением

$$\eta_e = \frac{E''}{E' + L} = 1 - \frac{\Sigma D}{E' + L}, \quad (1.29)$$

В компрессорах обычно осуществляется сжатие с промежуточным охлаждением рабочей среды (рис. 1.4), что позволяет существенно снизить удельную работу. В таких условиях уравнение эксергетического баланса компрессора (1.28) преобразуется к виду

$$L + E' = E'' + Q_{отв} \cdot \tau_e + \Sigma D, \quad (1.30)$$

где  $Q_{отв}$  — количество отведенной теплоты;

$\tau_e$  — эксергетическая функция, характеризующая температуру отведенной теплоты;

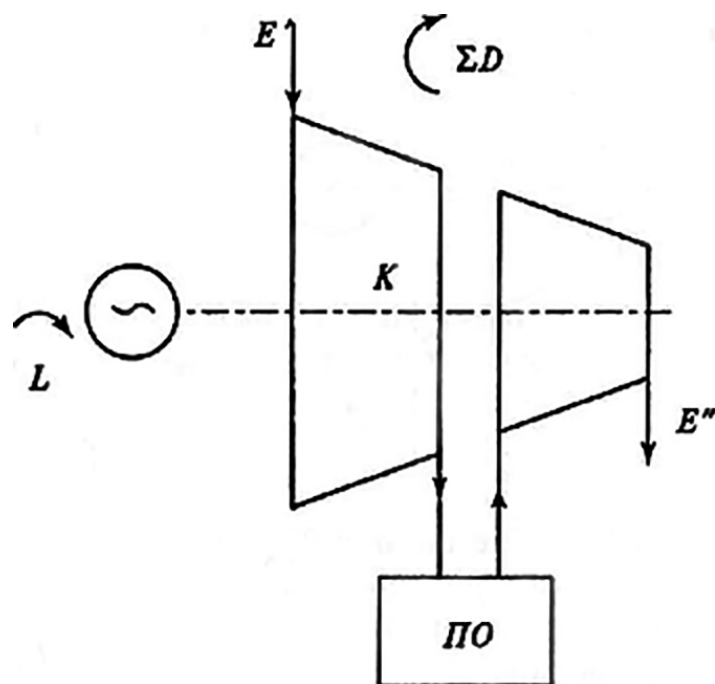


Рис. 1.4. Расчетная схема для построения эксергетического баланса компрессора с промежуточным охладителем:

К — компрессор; ПО — промежуточный охладитель

$E''$  — эксергия потока сжатого газа на выходе из компрессора. По сравнению с вариантом одноступенчатого сжатия она должна уменьшиться (при прочих равных условиях).

Выражение для расчета эксергетического КПД также изменится

$$\eta_e = \frac{E''}{E' + L} = 1 - \frac{Q_{отв} \cdot \tau_e + \Sigma D}{E' + L}. \quad (1.31)$$

В данном случае потери эксергии в системе возрастают, поскольку вся отведенная в промежуточном охладителе эксергия сбрасывается в атмосферу. В том случае, когда есть возможность ее утилизации, слагаемое  $Q_{отв} \cdot \tau_e$  «исключается» из потерь и «включается» в полезно воспринятую эксергию.

**3. Холодильные установки.** Парокомпрессионные термотрансформаторы, к которым относятся холодильные установки (понижающие) и тепловые насосы (повышающие), изображены на рис. 1.5. В понижающих установках холод вырабатывается в испарителе 4 за счет кипения хладагента. Затем хладагент сжимается в компрессоре 1, охлаждается и конденсируется в конденсаторе 2, дросселируется в дросселе 3 и возвращается в исходное состояние [1].



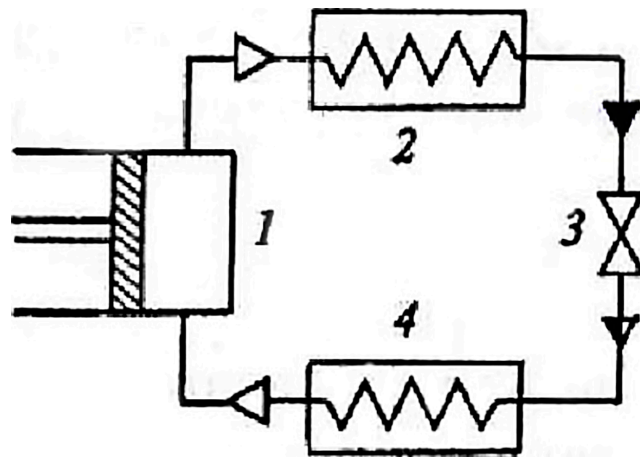


Рис. 1.5. Расчетная схема парокompрессионного термотрансформатора для построения эксергетического баланса

Эксергетический баланс холодильной установки имеет вид:

$$L = Q_x \cdot \tau_{ex} + \sum D, \quad (1.32)$$

где  $L$  — подведенная к компрессору работа, кВт;

$\tau_{ex}$  — температурная эксергетическая функция вырабатываемого холода;

$Q_x$  — количество теплоты, отведенной из испарителя, которое передается при температуре ниже температуры окружающей среды  $T_0$ , кВт.

Эксергетический КПД холодильной установки определяется из соотношения

$$\eta_e = \frac{Q_x \tau_{ex}}{L} = 1 - \frac{\sum D}{L}. \quad (1.33)$$

**4. В теплонасосных установках (ТНУ)** теплота утилизируемых ВЭР воспринимается в испарителе 4 за счет кипения рабочего агента. В результате его сжатия в компрессоре 1 повышаются параметры утилизируемой теплоты, которая отпускается внешним потребителям из конденсатора 2. Сконденсированный рабочий агент дросселируется в дросселе 3 и возвращается в исходное состояние.

Эксергетический баланс теплонасосной установки имеет вид

$$L + Q_x \tau_{ex} = Q_c \tau_{ex} + \sum D, \quad (1.34)$$

где  $L$  — подведенная к компрессору энергия для совершения работы сжатия, кВт;

$\tau_{ex}$  — температурная эксергетическая функция ВЭР, направляемых в испаритель,  $\tau_{ex} = \frac{T_0 - T_x}{T_x}$

$Q_x$  — количество теплоты ВЭР, воспринятой в испарителе, которое

передается при температуре выше температуры окружающей среды  $T_0$ , кВт;

$\tau_{er} = 1 - \frac{T_0}{T_r}$  — коэффициент ценности теплоты, отводимой из конденсатора при температуре конденсации  $T_r$ ;

$Q_r$  — количество теплоты, отведенной из конденсатора (горячий поток), кВт.

Эксергетический КПД теплового насоса определяется (1.35)

$$\eta_e = \frac{Q_r \tau_{er}}{L + Q_x \tau_{ex}} = 1 - \frac{\sum D}{L + Q_x \tau_{ex}}. \quad (1.35)$$

В том случае, когда на одной и той же теплонасосной установке вырабатываются холод в испарителе и теплота для внешних потребителей (в конденсаторе), уравнения эксергетического баланса и эксергетического КПД имеют вид (1.36, 1.37):

$$L = Q_r \tau_{er} + Q_x \tau_{ex} + \sum D, \quad (1.36)$$

$$\eta_e = \frac{Q_r \tau_{er} + Q_x \tau_{ex}}{L} = 1 - \frac{\sum D}{L}. \quad (1.37)$$

Из уравнений (1.34) — (1.37) следует, что при прочих равных условиях эффективность теплового насоса с одновременным отпуском теплоты и холода выше по сравнению с ТНУ, отпускающей только тепловую энергию.

**5. Поверхностный теплообменник.** В общем виде эксергетический баланс теплообменника (рис. 1.6) записывается как

$$E'_1 + E'_2 = E''_1 + E''_2 + \sum D, \quad (1.38)$$

где  $E'_1$  и  $E''_1$  — эксергия потока греющей среды на входе и выходе теплообменника;

$E'_2$  и  $E''_2$  — эксергия потока нагреваемой среды на входе и выходе теплообменника.

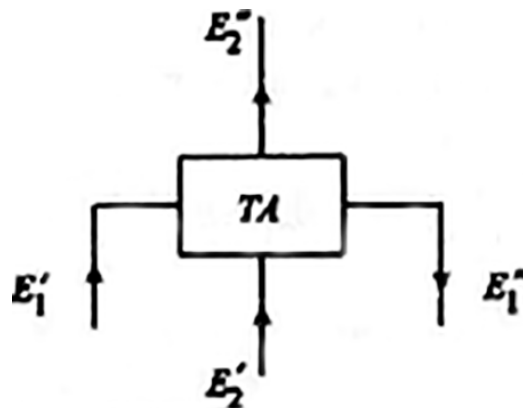


Рис. 1.6. Расчетная схема для построения эксергетического баланса поверхностного теплообменника

Выражение для расчета эксергетического КПД теплообменника имеет вид

$$\eta_e = \frac{E_1'' + E_2''}{E_1' + E_2'} = 1 - \frac{\Sigma D}{E_1' + E_2'} \quad (1.39)$$

Потери эксергии в теплообменнике происходят вследствие необратимости процесса теплопередачи, так как тепловосприятие осуществляется при более низкой температуре, чем подвод теплоты [1].

**5. Смесительный теплообменник.** В теплообменном оборудовании смесительного типа происходит контакт сред, в результате чего два или более входных потока соединяются в один. На рис. 1.7 показана расчетная схема теплообменника к построению эксергетического баланса.

Материальный баланс теплообменника имеет вид

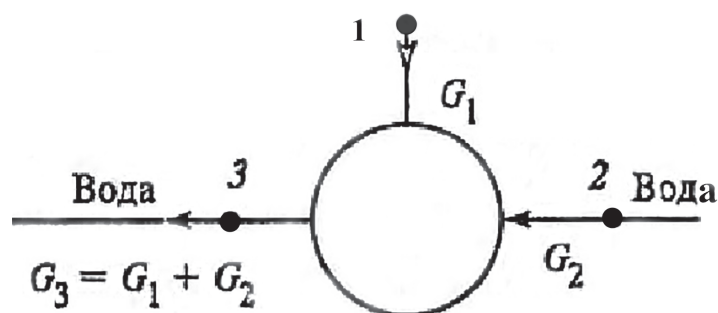


Рис. 1.7. Схема смешивающего подогревателя для построения эксергетического баланса:

1 — греющий пар; 2 — нагреваемая вода; 3 — нагретая вода

$$G_1 + G_2 = G_3 \quad (1.40)$$

$$\text{Пусть } G_1 = \alpha \cdot G_3, \quad (1.41)$$

где  $\alpha$  — доля потока с расходом  $G_1$  в суммарном расходе  $G_3$  потоков на выходе аппарата.

$$\text{Тогда } G_2 = (1 - \alpha) \cdot G_3 \quad (1.42)$$

Эксергетический баланс теплообменника, приведенный к 1 кг нагретой воды, представляется как

$$\alpha \cdot e_1 + (1 - \alpha) \cdot e_2 = e_3 + \Sigma D, \quad (1.43)$$

где  $e_1$  — удельная эксергия потока греющего пара, кДж/кг;

$e_2$  — удельная эксергия потока нагреваемой воды, кДж/кг;

$e_3$  — удельная эксергия потока нагретой воды, кДж/кг;

$\Sigma D$  — удельные потери эксергии в теплообменнике, кДж/кг.

Выражение для расчета эксергетического КПД теплообменника имеет вид

$$\eta_e = \frac{G_1 \cdot e_3^{\text{п}} + G_2 \cdot e_3^{\text{в}}}{G_1 \cdot e_1 + G_2 \cdot e_2} = 1 - \frac{\sum D}{G_1 \cdot e_1 + G_2 \cdot e_2}. \quad (1.44)$$

**7. Паровой эжектор** (рис. 1.12) также является смесительным аппаратом, на выходе которого образуется паровоздушная смесь.

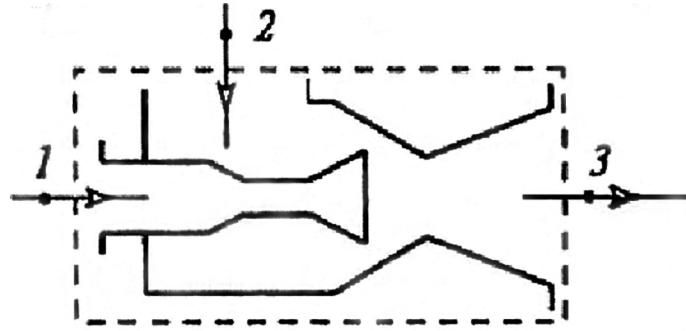


Рис. 1.8. Схема парового эжектора для построения эксергетического баланса:  
1 — пар; 2 — воздух; 3 — паровоздушная смесь

Эксергетический баланс эжектора представляется соотношением

$$G_1 \cdot e_1 + G_2 \cdot e_2 = G_1 \cdot e_3^{\text{п}} + G_2 \cdot e_3^{\text{в}} + \sum D, \quad (1.45)$$

где  $e_3^{\text{п}}$ ,  $e_3^{\text{в}}$  — эксергия пара и воздуха в образованной смеси.

Как правило, потери эксергии в смесительных теплообменниках значительно ниже, чем в поверхностных. Это связано с тем, что температура в них выше при прочих равных условиях.

Выражение для расчета эксергетического КПД эжектора имеет вид

$$\eta_e = \frac{G_1 \cdot e_3^{\text{п}} + G_2 \cdot e_3^{\text{в}}}{G_1 \cdot e_1 + G_2 \cdot e_2} = 1 - \frac{\sum D}{G_1 \cdot e_1 + G_2 \cdot e_2}. \quad (1.46)$$

## Контрольные вопросы к лекции 1

1. Перечислите основные этапы, которые проходит природный энергетический ресурс до стадии конечного использования энергии.
2. Укажите направления энергетического, неэнергетического и комбинированного использования ЭР.
3. Дайте определения энергетического баланса, подведенной и полезной энергии, а также потерь энергии. Как классифицируются потери энергии?
4. Какие материальные потоки включаются в расходную часть материального баланса технологического объекта? Как определяется коэффициент безотходности производства?
5. Перечислите требования, которые предъявляются к форме и содержанию энергетических балансов промышленных предприятий. По каким характеристикам можно определить эффективность энергоиспользования на промышленном объекте?
6. Для каких объектов промышленных предприятий следует проводить термодинамический анализ?
7. Перечислите основные этапы исследования термодинамической эффективности промышленной теплотехнологии.
8. Как определяется изменение эксергии в процессах сгорания топлива?
9. Какие компоненты входят в уравнение потока эксергии? Все ли эти компоненты необходимо учитывать при построении эксергетического баланса теплоэнергетических и теплотехнологических систем?
10. Поясните, какие составляющие входят в уравнение эксергии однородного вещества. Как изменится это уравнение, если вещество состоит из нескольких компонентов?
11. С помощью каких характеристик оценивается термодинамическая эффективность теплопотребления на промышленном предприятии? Что такое транзитная эксергия, и как она учитывается в данных характеристиках?
12. Объясните принцип построения эксергетического баланса паротурбинной установки.

13. Как на основе эксергетического баланса определяется термодинамическая эффективность воздушного компрессора?

14. Объясните принцип построения эксергетического баланса холодильной установки.

15. Как изменится структура эксергетического баланса теплового насоса, если одновременно с отпуском теплоты будет организован отпуск холода из испарителя ТНУ?

16. Поясните особенности построения эксергетического баланса смешительного теплообменника.

## **Лекция 2. МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ ДИСБАЛАНСОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **2.1. Причины возникновения дисбалансов прихода и расхода энергоносителей на промышленных предприятиях**

В условиях эксплуатации систем энергообеспечения группы потребителей часто возникает расхождение между поступлением и потреблением энерго-ресурсов.

Структура энергобаланса предприятий нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей выстраивается таким образом, что до 50 % тепловых энерго-ресурсов в виде пара и горячей воды поступает от заводских теплоутилизаторов, связанных с высокотемпературными технологическими установками (ВТТУ). Любое отклонение режима работы ВТТУ по производительности, теплосодержанию и химическому составу ВЭР оказывает непосредственное влияние на режим работы утилизационной установки (УУ). В результате возникают отклонения в графиках тепловых нагрузок УУ и отпуска потребителям вырабатываемых энергоносителей.

Режим работы потребителей теплоты изменяется случайно или систематически. Отклонение в нагрузке от номинальных показателей может наблюдаться как в течение нескольких секунд, так и на протяжении достаточно длительного периода — нескольких часов, дней или недель. Причины, вызвавшие их, заключаются в совпадении ряда факторов, к которым относятся: изменение производительности некоторых установок и технологических линий, проведение планово-предупредительных ремонтов и пр.

В результате в системах теплоснабжения возникают периоды избыточного и недостаточного поступления энерго-ресурсов по отношению к их потребности — дисбалансы. Для их сглаживания могут применяться различные методы — резервирование мощности теплогенераторов, аккумулялирование теплоты, установка пиковых источников энерго-ресурсов и пр. Однако организация таких мероприя-

тий помимо капитальных затрат связана с дополнительным потреблением топлива на предприятии, которое может оказаться значительным. Например, действительный годовой расход топлива на ТЭЦ с учетом его потребления пиковыми водогрейными котлами увеличивается на 2 — 5 % относительно теоретического, рассчитанного на режим работы турбин ТЭЦ с полной нагрузкой паровых отборов. При этом каждый процент увеличения затрат топлива на ТЭЦ приводит к пятикратному снижению показателей экономии топлива по сравнению с отдельным вариантом производства энергоносителей (ТЭЦ производит тепловую и электрическую энергию комбинированным способом. При отдельном варианте теплоносители производятся в котельной, электрическая энергия — на КЭС).

Избыточный кратковременный выход ВЭР на предприятиях приводит к необходимости сбрасывать теплоту в атмосферу, а горючие ВЭР — сжигать. При этом, кроме возникновения прямых финансовых потерь, наносится ущерб окружающей среде промышленного района.

Устойчивый избыток тепловых ВЭР наблюдается в летний период, когда по всем статьям потребления теплоты происходит снижение, и одной из главных проблем в этот период становится эффективное их использование. Часто ВЭР низких параметров применения не находят и сбрасываются в атмосферу непосредственно или при помощи специальных систем — обратного водоснабжения или воздушных холодильников. В этот период на предприятиях химической и нефтехимической промышленности резко возрастает нагрузка систем хладоснабжения, поэтому перспективным направлением использования ВЭР является выработка холода на тепловом потреблении на базе АТТ.

Еще одним способом утилизации избытка ВЭР является их использование для покрытия затрат теплоты на собственные нужды заводских источников теплоснабжения, прежде всего котельных. Например, для обеспечения тепловых нагрузок подогревателей сырой воды и частичного подогрева химически очищенной воды. Такое решение позволит несколько снизить нагрузку основного топливосжигающего оборудования источника и в результате достичь



экономии природного топлива.

Таким образом, организация эффективных систем и узлов, позволяющих устранять дисбалансы между поступлением и расходом энергоносителей, является одной из основных задач построения теплоэнергетического хозяйства промышленных предприятий.

Главным источником информации, на основе которой осуществляется выбор метода устранения дисбалансов по энергоносителям, являются графики тепловой нагрузки. Выбор методов, при помощи которых сглаживаются возникающие дисбалансы, производится в зависимости от выявленной (или предполагаемой на стадии проектирования) периодичности, продолжительности, а также отклонений параметров относительно их средних значений [1].

## 2.2. Тепловое аккумулирование энергоносителей

Одним из способов сведения балансов по энергоносителям на промышленных предприятиях является их резервирование в аккумулирующих установках. Под *тепловым аккумулированием* подразумеваются физические или химические процессы, в результате которых происходит накопление тепловой энергии в тепловых аккумуляторах [1].

Тепловой аккумулятор представляет собой емкость (обычно цилиндрической формы), в которой содержится аккумулирующая среда. К нему присоединяются устройства зарядки и разрядки аккумулятора, а также вспомогательное оборудование для обеспечения надежности и безопасности его эксплуатации. Все эти элементы в совокупности образуют тепловую аккумулирующую систему (ТАС), которая обеспечивает [12]:

- получение от источника энергии в количестве, необходимом для зарядки аккумулятора;
- трансформацию поступившей от источника энергии в требуемый потребителю вид, если в этом есть необходимость;
- передачу энергии потребителю в период разрядки аккумулятора.

Аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или

двухфазной, содержащей жидкие и газообразные компоненты. Процесс аккумуляции может протекать как без изменения фазового состояния, так и с фазовым переходом вида:

- твердое тело — твердое тело;
- твердое тело — жидкость;
- твердое тело — газ;
- жидкость — пар.

В общем виде энергетический баланс тепловой аккумуляющей системы представляется соотношением

$$\mathcal{E}_{ак} = \mathcal{E}_{вх} - \mathcal{E}_{вых}, \quad (2.1)$$

где  $\mathcal{E}_{ак}$  — аккумулярованная энергия, отпущенная потребителю, Дж;

$\mathcal{E}_{вх}$  — энергия, поступившая на зарядку аккумулятора от внешнего источника, Дж;

$\mathcal{E}_{вых}$  — энергия, отведенная от аккумулятора с отработанными энергоносителями, Дж.

Аккумуляция энергии может производиться за счет изменения массы системы, внутренней кинетической и потенциальной энергии потока.

Удельный материальный баланс теплового аккумулятора представляет собой соотношение

$$dg_{вх} - dg_{вых} = dg_{ак}. \quad (2.2)$$

Классификация тепловых аккумуляторов:

### 1. По аккумуляющей и греющей среде:

- прямое аккумулярование, когда аккумуляющей и греющей является одна и та же среда;
- косвенное аккумулярование — аккумулярование энергии производится теплопередачей через поверхность или в процессе массообмена с греющей средой;
- полупрямое аккумулярование, когда основную роль в процессе теплообмена играет рабочая емкость аппарата, например, твердая насадка регенеративного теплообменника;

— сорбционное аккумулирование, когда используется способность специфических рабочих сред абсорбировать газ с выделением теплоты и поглощать теплоту в процессе десорбции.

## **2. По массе аккумулирующей среды:**

- с постоянной массой  $dg_{ак} = 0$ ;
- с измененной массой  $dg_{ак} \neq 0$ .

## **3. По объему аккумулятора:**

- с постоянным объемом  $dv_{ак} = 0$ ;
- с переменным объемом  $dv_{ак} \neq 0$ .

## **4. По давлению в аккумуляторе:**

- с постоянным давлением  $dp_{ак} = 0$ ;
- со скользящим давлением  $dp_{ак} \neq 0$ .

Пароводяные аккумуляторы скользящего давления, используемые в теплоэнергетических системах промышленных предприятий, позволяют аккумулировать пар среднего давления за счет использования пара высокого давления. В отечественной практике такие устройства называются также аккумуляторами понижающегося давления.

Наиболее распространенные пароводяные аккумуляторы скользящего давления — это аккумуляторы Рутса (рис. 2.1). Корпус аккумулятора покрыт слоями тепловой изоляции и устанавливается на специальных опорах, обеспечивающих свободу термических расширений [13].

Время работы аккумулятора разбивается на периоды:

- зарядки, на протяжении которого отпуск аккумулируемого пара потребителям прекращается, а от внешних источников поступает греющий пар, теплота которого резервируется;
- разрядки, на протяжении которого производится отпуск аккумулируемого пара потребителям, а поступление греющего пара прекращается.

Аккумулирующей средой является вода. В начале периода зарядки вода находится в состоянии насыщения, соответствующем давлению отпускаемого пара.

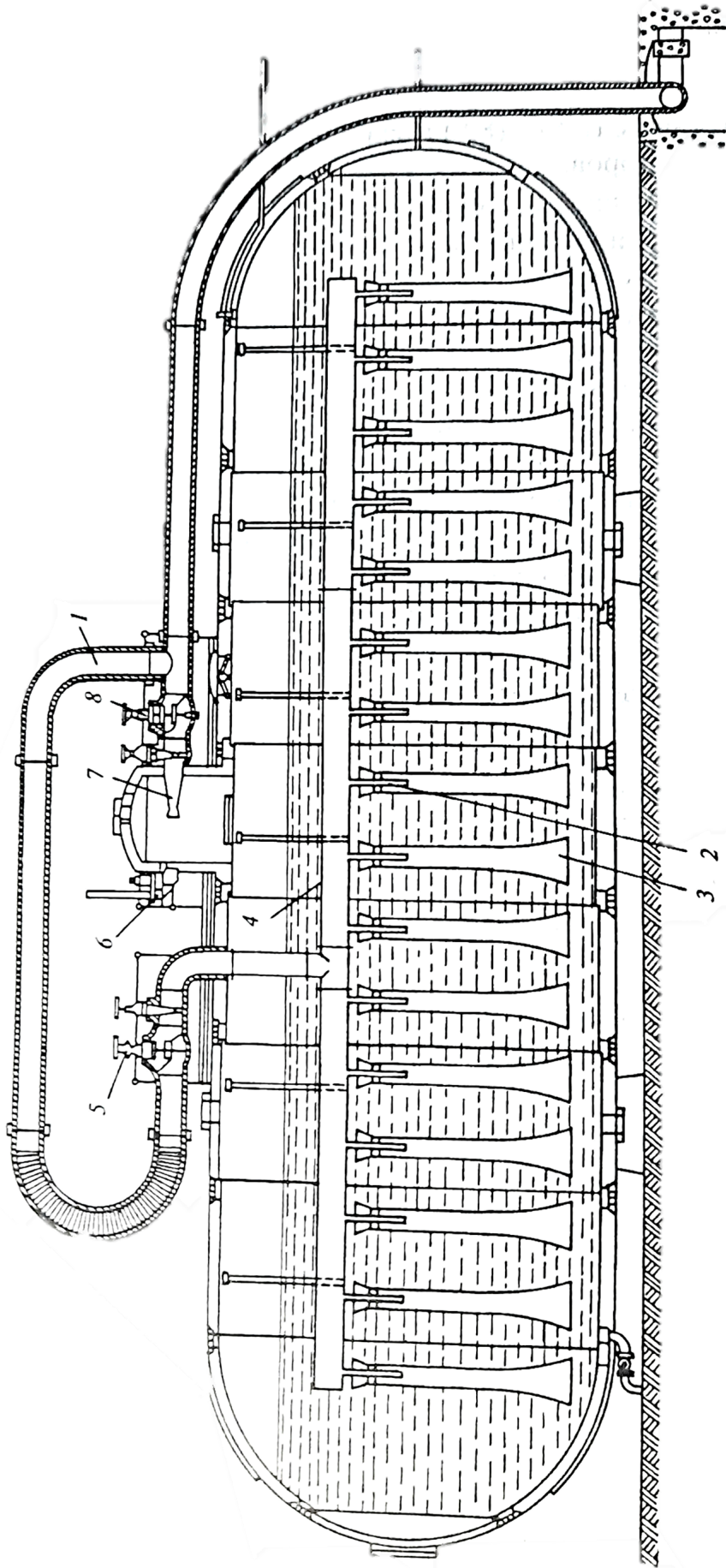


Рис. 2.1. Аккумулятор Рутса: 1- зарядный паропровод; 2 – обратный клапан; 3 – рас-  
 пределительная труба; 4 – циркуляционная труба; 5 – мундштук;  
 6 – паросборник-сепаратор; 7 – сопло Лавалья; 8 – разрядный обратный клапан

В процессе зарядки аккумулятора греющий пар по зарядному паропроводу 1 через обратный клапан 2 со скоростью 50 м/с поступает в горизонтальную распределительную трубу 3. К ней присоединена система зарядных элементов, включая циркуляционную трубу 4 и мундштук 5. Мундштук представляет собой перфорированную трубу с отверстиями диаметром 10 мм для впрыска «острого пара». За счет высокой скорости истечения пара вода подсасывается в кольцевое пространство, образованное мундштуком и циркуляционной трубой. В результате достигаются благоприятные условия для циркуляции воды и выравнивания температуры во всем рабочем объеме аккумулятора.

Давление греющего пара  $P_r$  должно быть существенно выше давления отпускаемого пара  $P_o$ , временный недостаток которого восполняется за счет установки теплового аккумулятора. На промышленных предприятиях, получающих энергоноситель от централизованных парогенерирующих установок,  $P_r$  обычно 1,4 — 3,6 МПа, при этом  $P_o$  преимущественно находится в пределах 0,4 — 1,0 Мпа.

По мере поступления в резервуар греющего пара в рабочем объеме аккумулятора постепенно повышается давление и происходит контактный нагрев воды за счет конденсации пара. По окончании периода зарядки в сосуде устанавливается давление, равное  $P_r$ . Параметры аккумулирующей среды соответствуют состоянию насыщения при этом давлении [1].

При выдаче пара потребителям в период разрядки аккумулятора в рабочем объеме происходит постепенное падение давления. Этот процесс сопровождается образованием пара вторичного вскипания, который продолжается до тех пор, пока в резервуаре не установится давление, равное  $P_o$ .

Интенсивного кипения воды в объеме резервуара не происходит, а основная доля пара образуется у поверхности раздела фаз. В этой области происходит интенсивное охлаждение воды и возникают вертикальные потоки естественной конвекции — горячая вода из нижних слоев поднимается вверх, а охлажденная из верхних слоев опускается вниз.

В верхней части аккумулятора расположен паросборник-сепаратор 6. В нем устанавливается сопло Лавалья 7, предназначенное для ограничения интенсивности парообразования в процессе разрядки аккумулятора.

Регулятор давления 8 на разрядном паропроводе предназначен для поддержания давления отпускаемого пара на необходимом уровне.

В процессе работы аккумулятора происходит значительное колебание уровня воды. Однако его увеличение до 90 — 95 % заполнения резервуара грозит захлестом воды в разрядный паропровод и усилением каплеуноса. Напротив, чрезмерное уменьшение уровня заполнения способствует снижению аккумулялирующей способности установки.

Уровень воды в резервуаре поддерживается автоматически. С этой целью аккумулятор подключается к продувочному и питательному конденсатопроводам, на которых устанавливаются клапаны, регулирующие слив и подачу воды в соответствии с сигналом, передаваемым от уровнемера.

Принципиальная схема подключения аккумулятора представлена на рис. 2.2.

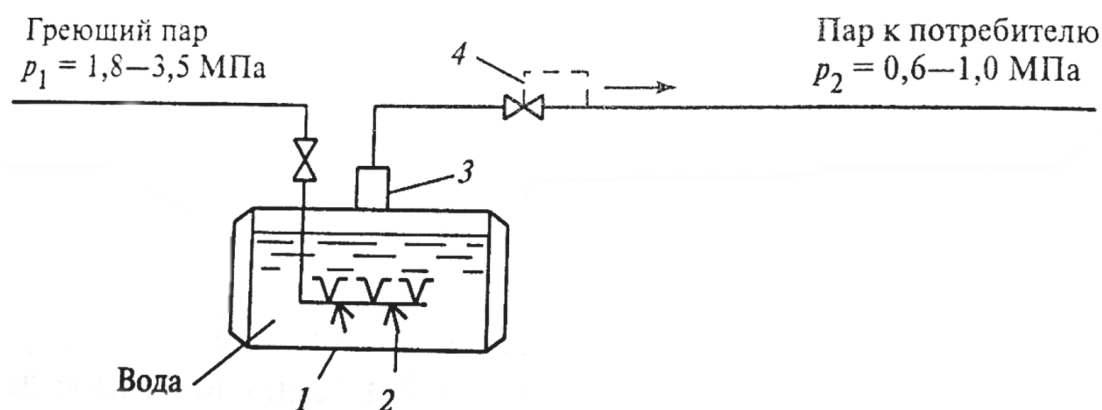


Рис. 2.2. Принципиальная схема подключения аккумулятора:  
1 — бак-аккумулятор; 2 — смешивающий подогреватель; 3 — паросборник-сепаратор; 4 — регулятор давления

Аккумулялирующая способность пароводяного аккумулятора характеризуется количеством пара, которое может быть получено в период разрядки при заданном перепаде давлений  $P_r/P_o$ , и определяется соотношением

$$A = \alpha \cdot V, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  — удельная аккумулялирующая способность, приведенная на 1 м<sup>3</sup> водяного объема аккумулятора, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  — объем аккумулятора, м<sup>3</sup>.

Величина  $\alpha$  при фиксированных значениях  $P_r$  и  $P_0$  может быть найдена из уравнения удельного теплового баланса аккумулятора

$$\alpha \cdot (h''_0 - h'_B) = \rho' \cdot (h'_B - h'_0), \quad (2.4)$$

где  $h''_0$  — энтальпия отпускаемого пара в процессе разрядки, кДж/кг;

$h'_B$  — энтальпия воды в начале процесса разрядки, кДж/кг;

$h'_0$  — энтальпия воды в конце процесса разрядки, кДж/кг;

$\rho'$  — плотность воды при давлении  $P_r$  в конце процесса зарядки, кг/м<sup>3</sup>.

В начале процесса разрядки давление в резервуаре близко к  $P_r$ . При выдаче пара потребителю через клапан 8 (см. рис. 2.1), происходит его дросселирование до давления  $P_0$ . При этом он перегревается относительно температуры насыщения, соответствующей данному давлению, а его энтальпия близка к  $h''_r$  — энтальпии насыщенного пара при давлении  $P_r$ . По мере снижения давления в резервуаре снижается и энтальпия отпускаемого пара. В конце процесса разрядки его энтальпия близка к  $h''_0$  — энтальпии насыщенного пара, соответствующей давлению  $P_0$  [1].

Если определять удельную аккумулирующую способность аккумулятора по энтальпии отпускаемого пара в начале процесса разрядки, она будет несколько завышенной. Для повышения точности расчета процесс расширения пара разбивается на несколько ступеней с равным шагом изменения давления (рис. 2.3), а затем определяется среднее значение энтальпии

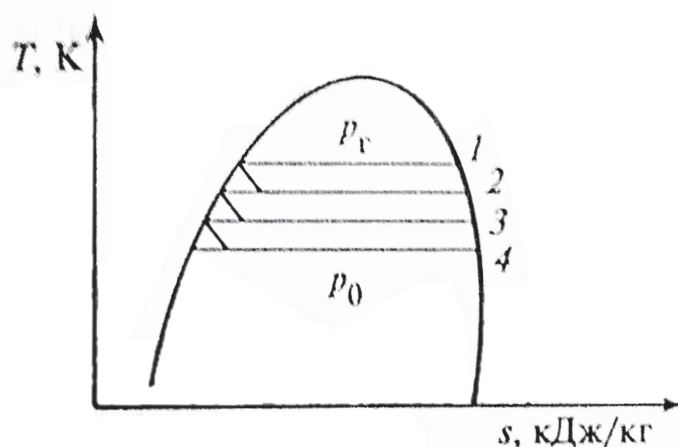


Рис. 2.3. Процесс расширения пара в аккумуляторе в  $T, s$  — диаграмме: 1-4 — точки, соответствующие состоянию пара в процессе расширения от давления  $P_r$  до  $P_0$ .

$$\tilde{h}_0'' = \frac{\sum_{n=1}^N h_{0n}''}{N}, \quad (2.5)$$

где  $N$  — количество выделенных ступеней расчета.

Таким образом,

$$a = \rho' \frac{(h'_B - h'_0)}{(\tilde{h}_0'' - h'_B)}. \quad (2.6)$$

Материальный баланс аккумулятора имеет вид

$$G_0 = G_1 - G_2, \quad (2.7)$$

где  $G_0$  — количество пара, отпущенного потребителям, кг;

$G_1$  — масса воды в начале процесса разрядки, кг;

$G_2$  — масса воды в конце процесса разрядки, кг.

Количество теплоты, отпущенной потребителям с паром вторичного вскипания, определяется из уравнения теплового баланса, кДж,

$$Q_0 = G_0 \cdot \tilde{h}_0'' = G_1 \cdot h'_B - G_2 \cdot h'_0. \quad (2.8)$$

Полная паропроизводительность аккумулятора в процессе разрядки находится

$$G_0 = G_1 \frac{(h'_B - h'_0)}{(\tilde{h}_0'' - h'_0)}. \quad (2.9)$$

Основной задачей расчета пароводяного аккумулятора является определение необходимого объема резервуара для обеспечения требуемой выдачи пара за определенный период времени. Исходя из (2.3), а также учитывая требование заполняемости резервуара водой не более, чем на 90—95%, его объем можно найти из соотношения

$$V = A/(\varepsilon \cdot \alpha),$$

где  $\varepsilon = 0,9 — 0,95$  — коэффициент заполнения водой внутреннего объема аккумулятора.

Аккумулирующая способность аккумулятора определяется по реальным графикам расхода пара на промышленном предприятии.

На рис. 2.4 представлены схемы установки паровых аккумуляторов в паровых сетях.



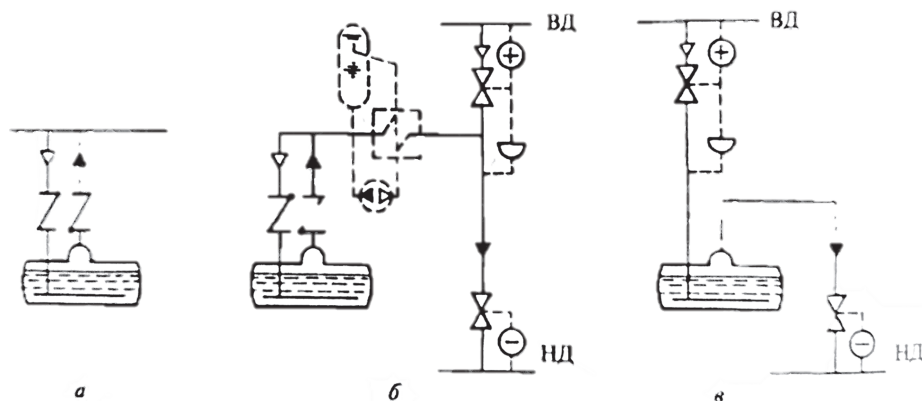


Рис. 2.4. Присоединение пароводяного аккумулятора Рутса к источнику греющего пара и потребителям аккумулируемой тепловой энергии:

а — сеть со скользящим давлением; б — паровой аккумулятор в отведенном потоке сетей высокого (ВД) и низкого (НД) давления; в — паровой аккумулятор между сетями высокого и низкого давления

Давление в промышленных паровых сетях поддерживается постоянным, однако могут допускаться и небольшие его колебания. В таких случаях аккумулятор присоединяется непосредственно к сети через два обратных клапана [12]. Определение необходимой емкости аккумулятора производится по значениям допустимых пределов колебания давления (рис. 2.4а).

Если на предприятии два паропровода, в которых поддерживается разное давление пара, между ними может быть установлен аккумулятор, схема присоединения которого представлена на рис. 2.4б. Для регулирования давления в сети низкого давления не требуется сложной регулирующей системы, поскольку редукторы давления приводятся в действие давлением верхней сети и поддерживают данный параметр на требуемом уровне.

На рис. 2.4в приведена другая схема присоединения аккумулятора. Верхняя сеть через регулятор давления соединена с зарядным трубопроводом, нижняя сеть — через редуктор давления с разрядным трубопроводом. Обратные клапаны не устанавливаются, однако в этом случае трубопроводы должны быть рассчитаны на полный расход пара через регулятор и редуктор давления, в то время как в предыдущей схеме определялась разность этих расходов.

На рис. 2.5 показаны схемы включения аккумулятора в системы комбинированной выработки пара и электроэнергии. Между сетями высокого (постоянного)

и низкого (переменного) давления установлена паровая турбина с противодавлением. Аккумулятор пара установлен параллельно турбине — когда она работает в режиме базисной загрузки, через нее проходит только минимальное количество пара, направляемого затем в сеть низкого давления. Остальное количество пара поступает в аккумулятор [1].

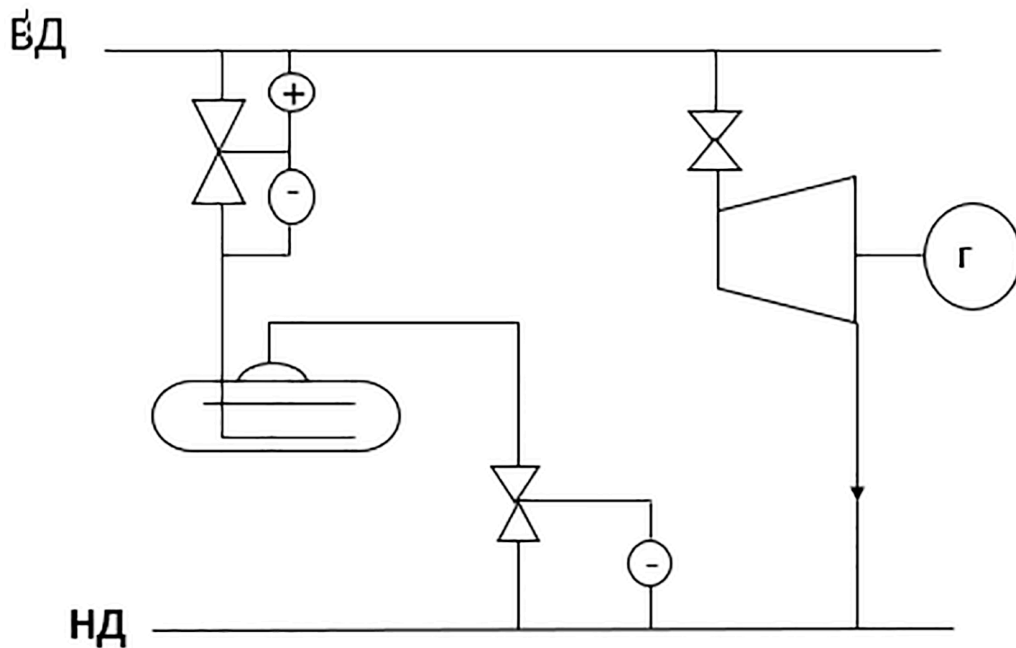


Рис. 2.5. Включение парового аккумулятора в систему выработки теплоты и электроэнергии

### 2.3. Резервирование мощности теплогенераторов

Резервирование мощности теплогенераторов состоит в том, что установки — источники систем теплоснабжения выбираются на завышенный отпуск тепловой энергии, и, следовательно, большую часть года они вынуждены работать в условиях, отличных от расчетных оптимальных.

Если отпуск теплоты осуществляется от котельной, это означает, что тепловой КПД котла, приведенный к среднегодовым показателям, снижается относительно номинального, возрастает удельный расход топлива на выработку 1 ГДж теплоты, и растет ее себестоимость [1].

Экономия топлива на ТЭЦ по сравнению с отдельным вариантом возможна только при соблюдении условия

$$\mathcal{E}^m \cdot (\Psi \cdot b_{кэс} - b^{э.м}) > \mathcal{E}_{ТЭЦ}^k \cdot (b_{ТЭЦ}^{э.к.} - \Psi \cdot b_{кэс}). \quad (2.10)$$

Таким образом, минимально допустимое соотношение выработки электроэнергии на ТЭЦ комбинированным и конденсационным способами, при котором экономия топлива нулевая ( $\Delta B_{эк} = 0$ ), составляет [14]

$$\frac{\mathcal{E}^T}{\mathcal{E}_{ТЭЦ}^k} = \frac{b_{ТЭЦ}^{э.к.} - \Psi \cdot b_{кэс}}{\Psi \cdot b_{кэс} - b^{э.т}}. \quad (2.11)$$

Однако при нулевой экономии топлива на ТЭЦ будет наблюдаться рост приведенных затрат по сравнению с отдельным вариантом, так как капитальные затраты здесь выше и, следовательно, выше и прочие сопутствующие статьи расходов.

Резервирование тепловой мощности возможно организовать двумя способами:

1. Держать в резерве дополнительную турбину. При этом турбина и ее парогенератор должны постоянно находиться в работе, так как необходимость дополнительного отпуска пара может появиться в любой момент.

2. Выбрать основные турбины с завышенной мощностью по тепловым отборам.

Применение этих способов приводит к снижению экономии топлива и росту приведенных затрат, так как суммарный отпуск пара из отборов турбин ТЭЦ практически не зависит от того, каким образом распределяется пиковая нагрузка между турбинами. Это же относится и к суммарной выработке электроэнергии на тепловом потреблении [15].

Отпуск дополнительного количества пара от пиковых паровых котлов и даже от парогенераторов турбин через редуционно-охлаждающее устройство (РОУ) по сравнению с этими вариантами оказывается значительно выгоднее. В частности, на ТЭЦ для отпуска одинакового с котельной количества теплоты необходимо сжигать в 2 — 2,5 раза больше топлива, что пагубно влияет на окружающую среду [1].

## 2.4. Использование пиковых источников энергоресурсов

На ТЭЦ пиковыми источниками, позволяющими обеспечить недостаток тепловых отборов в наиболее напряженный период работы тепловых сетей, являются пиковые водогрейные котлы. При значительных отклонениях в потреблении пара промышленных параметров, как уже упоминалось выше, возмож-

ны установка пиковых паровых котлов или отпуск дополнительного количества пара через РОУ непосредственно от парогенераторов турбин. Однако в последнем случае установленные на ТЭЦ парогенераторы должны иметь резерв паропроизводительности или необходим дополнительный резервный котел.

При возникновении длительного и систематического дефицита промышленного пара, в том числе и сезонного характера, на предприятии могут быть установлены собственные пиковые паровые котлы. Для этого необходимо содержать специальную систему водоподготовки, устанавливать специальное дорогостоящее оборудование и нести дополнительные затраты для обеспечения системы топливными ресурсами и поддержания ее в работоспособном состоянии.

Иногда дисбалансы с поступлением и использованием пара промышленных параметров связаны с неравномерностью производительности котлов-утилизаторов (КУ), в свою очередь зависящих от режима основной технологической установки — источника ВЭР (дымовых газов или газо- и парообразных продуктов). Одним из способов устранения таких дисбалансов является выравнивание паропроизводительности КУ при помощи подтопки (рис. 2.6) [15].

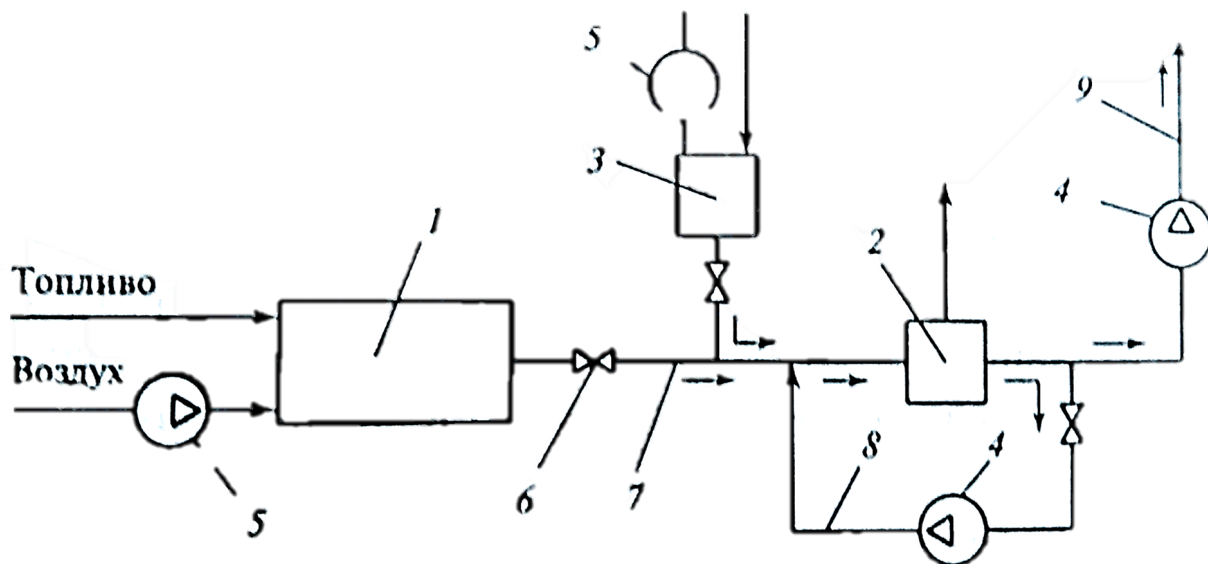


Рис. 2.6. Схема установки котла-утилизатора за технологическим агрегатом с подтопкой и рециркуляцией дымовых газов: 1 — технологический агрегат; 2 — котел-утилизатор; 3 — подтопка; 4 — дымосос; 5 — вентилятор; 6 — задвижка; 7 — 9 — газоход

Подтопка включается в работу в том случае, когда расход и температура дымовых газов, поступающих от технологического агрегата, снижаются. Возможна ее работа и при полном отключении агрегата. Топливо в подтопке сжигается при малых избытках воздуха, что позволяет избежать дополнительных потерь с уходящими газами в КУ. Температура продуктов сгорания на входе в КУ регулируется подмешиванием холодного воздуха, забираемого из атмосферы или, что более эффективно, при помощи рециркуляции дымовых газов.

Коэффициент использования топлива при полной остановке топливосжигающего агрегата-источника достигает 87 %, что связано с поддержанием теплоты продуктов сгорания на уровне, близком к номинальному расчетному [1].

При снижении производительности агрегата и восполнении недостатка поступления ВЭР подтопкой коэффициент использования топлива в утилизационной системе несколько снижается, потому что снижаются параметры дымовых газов (в основном из-за понижения температуры).

КПИ теплоты дымовых газов в КУ определяется соотношением

$$\eta_{\text{ку}} = \frac{c_p t_{\text{д.г}} - c_p t_{\text{ух}}}{c_p t_{\text{д.г}}} = 1 - \frac{c_p t_{\text{ух}}}{c_p t_{\text{д.г}}}, \quad (2.12)$$

где  $t_{\text{ух}}$  — температура уходящих газов на выходе из КУ, °С;

$t_{\text{д.г}}$  — температура дымовых газов на входе в КУ, °С;

$c_p$  — изобарная теплоемкость дымовых газов при расчетной температуре, кДж/(кг°С).

КПИ теплоты дополнительно сжигаемого в подтопке топлива

$$\eta_{\text{н.т}} = \frac{\Delta D \Delta h_{\text{п}}}{Q_{\text{топ}}}, \quad (2.13)$$

где  $\Delta D$  — дополнительное количество пара, получаемого за счет подтопки, кг/с;

$Q_{\text{топ}}$  — количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, кВт;

$\Delta h_{\text{п}}$  — удельное количество теплоты, необходимое для достижения требуемых параметров пара, кДж/кг:

$$\Delta h_n = h_n - h_{n.с}, \quad (2.14)$$

где  $h_n$  — удельная энтальпия пара на выходе из КУ, кДж/кг;

$h_{n.в}$  — удельная энтальпия питательной воды на входе в КУ, кДж/кг.

За счет использования подтопки паропроизводительность КУ увеличивается на 20 % выше номинальной, при этом себестоимость дополнительно получаемого пара оказывается ниже, чем при получении его от пиковых котлов, так как она состоит в основном из затрат на топливо и питательную воду. Капитальные затраты на подтопку по сравнению с затратами на сооружение утилизационной системы с КУ составляют всего несколько процентов [15].

## Контрольные вопросы к лекции 2

1. Какие причины приводят к возникновению дисбалансов поступления энергоносителей на промышленные предприятия?
2. Какие методы позволяют сглаживать дисбалансы в периоды недостаточного поступления тепловых энергоресурсов и периоды их переизбытка?
3. Запишите дифференциальное уравнение сохранения энергии в тепловом аккумуляторе и поясните его основные составляющие.
4. Что представляет собой тепловая аккумулирующая система?
5. Какие виды тепловых аккумуляторов вы знаете?
6. Приведите классификацию тепловых аккумуляторов.
7. Поясните принцип работы теплового аккумулятора Рутса.
8. Как определяются аккумулирующая способность пароводяного аккумулятора и его необходимый объем?
9. Объясните принцип работы схем присоединения аккумулятора к паровым сетям промышленного предприятия, изображенных на рис. 2.4.
10. Какие существуют способы резервирования тепловой мощности теплогенератора и как они влияют на энергоэкономические показатели системы теплоснабжения?
11. Поясните, в каких случаях подтопка может рассматриваться в качестве пикового источника теплоты.
12. Оцените энергоэкономические показатели подтопки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назмеев, Ю.Г. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий [Текст] / Ю.Г. Наумов, И.В. Конахина. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
2. Некрасов, А.С. Построение и анализ энергетического баланса [Текст] / А.С. Некрасов, Ю.В. Синяк, В.А. Ямпольский. — М.: Наука, 1974.
3. Кафаров, В.В. Принципы создания безотходных производств [Текст] / В.В. Кафаров. — М.: Химия, 1982.
4. Методические указания по разработке и анализу энергетических балансов предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Текст]. — М.: ВНИИПНефть, 1982.
5. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Сажин, Б.С. Эксергетический метод в химической технологии [Текст] / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. — М.: Химия, 1992.
7. Бродянский, В.М. О моделях окружающей среды для расчета химической эксергии. Теоретические основы химической технологии [Текст] / В.М. Бродянский, М.В. Сорин. — М.: Наука, 1984.
8. Шаргут, Я. Эксергия [Текст] / Я. Шаргут, Р. Петела. — М.: Энергия, 1968.
9. Аракелов, В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов [Текст] / В.Е. Аракелов, А.И. Кремер. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. Янтовский, Е.И. Промышленные тепловые насосы [Текст] / Е.И. Янтовский, Л.А. Левин. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Григоров, В.Г. Утилизация низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов на химических предприятиях [Текст] / В.Г. Григоров, В.К. Нейман, С.Д. Чураков и др. — М.: Химия, 1987.
12. Бекман, Г. Тепловое аккумулирование энергии [Текст] / Г. Бекман, П. Гилли. — М.: Мир, 1987.
13. Куперман, Л.И. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности [Текст] / Л.И. Куперман, С.А. Романовский,



Л.Н. Сидельковский. — Киев: Вища школа, 1986.

14. Берлин, З.Л. Рациональное использование вторичных энергоресурсов цветной металлургии [Текст] / З.Л. Берлин. — М.: Металлургия, 1972.

15. Сазанов Б.В., Теплоэнергетические системы промышленных предприятий [Текст] / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

---

Редактор и корректор Н.П. Новикова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Компьютерная верстка Д.А. Романова

Темплан 2021 г., поз. 25

Подписано к публикации 01.06.21. Электронное издание.

Уч-изд. л 3,75. Изд. № 25.

---

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.