

**Министерство образования и науки
Российской Федерации
ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»**

Новомосковский институт (филиал)

Лобанов Н.Ф.

**Теоретические основы энерго-
ресурсосбережения в химической
промышленности**

Учебное пособие

изд. 2-е, переработанное и дополненное

**Новомосковск
2011**

УДК 66.02.04
ББК 35.11
Т 291

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук *Бабокин Г.И.*
(НИ (филиал) ГОУ ВПО РХТУ им. Д.И.Менделеева)
кандидат технических наук, *В.Л.Гартман*
(ОАО НИАП г. Новомосковск)

Лобанов Н.Ф.

Т 291 « Теоретические основы энергоресурсосбережения». Учебное пособие **изд. 2-е, переработанное и дополненное** / ГОУ ВПО «РХТУ им. Д.И.Менделеева», Новомосковский институт (филиал); Новомосковск, 2011. – 64 с.

Учебное пособие содержит в кратком изложении материалы по основам эксергетического анализа химико–технологических систем в процессах потребления, утилизации и полезного использования энергоматериальных ресурсов. В пособии дана методика построения эксергетических диаграмм и оценки уровня собственных и технических потерь эксергии. Научные основы ресурсосбережения изложены на фоне особенностей климатогеографических условий производства в Российской Федерации с учетом ограниченности сырьевых запасов страны. В ней приведены принципы построения энерготехнологических процессов, методы синтеза химико-технологических систем критерии оценки энерготехнологического совершенства аппаратурных схем.

Ил. 20. Библиогр.: 11.

УДК 66.02.04
ББК 35.11

© Лобанов Н.Ф., 2011

© ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева », Новомосковский институт (филиал), 2011

Введение

Данный курс направлен на изучение основных принципов и закономерностей экономии текущих затрат энергоматериальных ресурсов.

Задачей курса является изучение способов:

- а) минимизации расхода «свежих» ресурсов энергии и материалов;
- б) оптимизации использования вторичных энергоматериальных ресурсов.

Дальнейшее развитие России как самостоятельной промышленной державы невозможно без увеличения степени использования наличных запасов сырья и энергии, особенно с учетом климатических условий и географического положения Российской Федерации.

Особенности географии и климата России.

Климат Российской Федерации существенно на базисном уровне отличается в худшую сторону от климата практически всех промышленно развитых стран [1].

В европейской части России летние изотермы направлены по широте, а зимние изотермы по долготе, т.е. с севера на юг. Это связано с теплым течением Гольфстрим, которое огибает Европу в районе Англии и Скандинавии. К примеру, изотерма нулевой температуры в январе проходит через юг Скандинавии, Данию, Центральную Германию, в обход горных Альпийских массивов идет на Хорватию, пересекает Северную Грецию, поднимается к южному берегу Крыма и Сочи и через Грузию уходит на юг. Это означает что в январе средняя температура юга Норвегии и севера Греции одинаковы.

В труде французского географа XIX века Жан Эллиса Раклю «Земля и люди» указывается, что пригодны для обитания увлажненные территории на высоте не более 2000 м над уровнем моря и имеющие среднюю годовую температуру не менее - 2°C. Это так называемые «эффективные» территории, по площади которых РФ занимает пятое место в мире, причем 65% территории вечная мерзлота

Для Москвы средняя температура +3,8°C;

Для Санкт Петербурга средняя температура + 4,3°C;

Для Вены, Одессы, Софии, Ванкувера +9,5°C;

Для Иваново средняя температура + 2,5°C;

Т.е. обитаемая территория России расположена у нижней границы об-
основанного минимума средних температур.

По мере развития цивилизации человечество осваивало все более «холодные» регионы: Египет – среднегодовая температура +26; междуречье Ирака и Китая +22°C; государства Греции и Рима +16°C и т.д.

Неблагоприятность климата проявляется в экономическом плане следующим образом [2]:

- 1) Капзатраты на строительство. К примеру, требуется заглубление фундаментов на уровень ниже глубины промерзания (в районе Тулы более 140 см; в районе Копенгагена, расположенном севернее, 50-70см;)
- 2) Снижение биологической продуктивности растений из-за малого периода роста (в Ивановской области около 90 дней, в Тульской области около 120 дней, на Украине, Белоруссии 120 – 160 дней, в Германии 170 – 220 дней, во Франции 220 – 270 дней, в США в зависимости от штата от 200 до 360 дней). В результате годовой прирост биомассы с гектара леса в Центральной России составляет 60 – 70 центнеров, а в центральной Европе 120 – 130 центнеров.
- 3) Экстремальные транспортные расходы:
 - а) на перевозку грузов;
 - б) на строительство и поддержание дорог.

Климатические условия региона Новомосковска.

- 1) Продолжительность отопительного сезона 207 дней;
- 2) Экстремальные температуры: - 42⁰С , + 38⁰С;
- 3) Средняя температура за месяц : июль +18,4⁰С, январь -10,1⁰С;
- 4) Средняя температура за сутки: июль + 24,2⁰С, январь -31⁰С;
Суровость климата определяется соотношением минимальной и максимальной температуры;
- 5) Влажность 65% летом, 86% зимой;
Скорость ветра 3,8 м/с летом, 4,9 м/с зимой,
Максимальная скорость ветра 20-25 м/с;
- 6) Осадки 678 мм в год (542 мм в виде дождя).

Издержки производства и стоимость жизни связаны с суровостью климата и обширностью территорий Российской Федерации, не зависят от политических и социальных аспектов организации общества. В отличие от налогов, зарплат, социальных и пенсионных отчислений климато - географические особенности России (в отличие от других развитых стран) носят базисный характер, т.е. не могут быть изменены по воле людей.

Вследствие вышеизложенного проблемы экономного и рационального использования энергоресурсов всех видов особенно актуальны для России. Для решения этих проблем в РФ приняты законы “О энергосбережении ” (1996 г) и “О энергоэффективности ” (2009г).

Энерго-сырьевая база Российской Федерации.

Запасы полезных ископаемых, оставшиеся на территории Российской Федерации после распада СССР, можно измерить количеством лет их добычи на максимальном уровне (1991г.)

Таблица 1.

Нефть	35* лет (5-6% мировых запасов)
Природный газ	81 год (31% мировых запасов)
Уголь	60-500 лет (60%)
Железные руды	42 года
Медь	40 лет(90% уходит на экспорт)
Никель	40 лет
Молибден	40 лет
Вольфрам	37 лет
Золото коренное	30 лет
Цинк	18 лет
Свинец	15 лет
Фосфаты	52 года
Калийные соли	112 лет
Уран 235	40-50 лет
С учетом ОЯТ** через уран 238	120 лет
Алюминий	Сотни лет
Отсутствует хром и марганец	

Опубликованные в прессе данные по стоимости всех природных запасов России составляют в современных мировых ценах от 10 трлн. \$ (данные института экономики РАН) до 320-380 трлн. \$. Существующий разницей в цифрах (в 40 раз) является опасным фактором, допускающим политические спекуляции.

При объеме запасов в 10 трлн. \$ на конец 20 века при 100% продаже их зарубеж на одного россиянина будет приходиться 2000 \$ в год, 166 \$ в месяц в течение 100 лет.

Примечание:

* - По оценкам «легкой» для добычи нефти осталось на 8-10 лет (2009год)

**ОЯТ – отработанное ядерное топливо

В стоимостном выражении на газ приходится – 32%, на уголь 23%, на нефть – 16%, на нерудное сырье – 15%, на черные и цветные металлы – 13%, золото и платина ~ 1%. В перспективных запасах (с учетом разведки новых территорий) доля угля может вырасти до 60 – 70 %.

При вывозе материальных ресурсов большую отрицательную роль играет дисбаланс внутренних и внешних цен на энергию. В частности, в Западной Европе 1 кВт энергии стоит 0,15 евро, у нас 0,04 евро. Цена на нефть и газ внутри страны в 5 – 7 раз ниже чем на мировом рынке, в частности при

цене на газ в России около 1000 руб. за 1000 м³, мы продаем его в Грузию за 110 \$, Украину – 230 \$, Германию – 250 \$. Население в Германии покупает наш газ за 550\$ за 1000м³(данные 2000г).*

Низкие внутренние цены отрицательно влияют на экономику России в двух аспектах:

- а) Они не стимулируют модернизацию техники в сторону энергоресурсосбережения;
- б) Они провоцируют паразитический экспорт энергоресурсов в виде готовой продукции, поставляемой по минимальным ценам. В частности электроэнергия вывозится в виде алюминия, природный газ в виде минеральных азотных удобрений и т.п.

В настоящее время этот дисбаланс выравнивается путем директивного повышения цен на газ и электроэнергию с темпом в 1,5 – 2 раза превышающим процент инфляции.

* - В 2008 г. цена на газ в Германии (для населения) составляла около 900 € за 1000м³.

Экономические аспекты ресурсо-энергосбережения.

Эта проблема приобретает особо важное значение для нашей страны в аспекте вступления России в ВТО, которая требует от Российской Федерации переход на мировые цены на энергоносители внутри страны.

Стимулом для промышленного развития в условиях рынка, особенно, в его глобальной модификации через ВТО является наличие максимальной разницы между уровнем мировых цен на продукцию (общее для всего рынка) и издержек на производство (индивидуальные для каждой страны и региона).

В издержки производства необходимо включать следующие статьи расходов:

- 1) Энергоматериальные затраты (в удобрениях они достигают до 80 % цены);
- 2) Транспортные расходы;
- 3) Амортизация оборудования и сооружений;
- 4) Заработная плата и сопряженные с ней страховые выплаты;
- 5) Прочие накладные расходы.

Разность между ценой изделия и его себестоимостью называется балансовой прибылью.

Для обеспечения среднемирового уровня производства на человека необходимо затратить в Японии – 3,5 тонн условного топлива, во Франции – 4 тонны, в США – 8 тонн (включая Аляску), в Германии – 6 тонн, в России – 18 тонн условного топлива.

В связи с большими издержками на производство на протяжении 1993 – 2003 г. (за 10 лет) прямые инвестиции составили в Китай – 396 млрд. \$, Бра-

зилия – 158 млрд. \$, Чехия – 31 млрд. \$, Россия – 28 млрд. \$, Венгрия – 22 млрд. \$, Словения – 9 млрд. \$, Эстония – 8 млрд. \$.

В 1996 г. в России был принят закон об энергосбережении, который позволяет стимулировать через уменьшение налогов и тарифов на энергоресурсы, затраты на мероприятия по их экономии. Этот закон должен быть обеспечен финансовым покрытием на уровне 300 млрд. \$ в течение ближайших десяти лет. В рамках развития концепции энергосбережения в России вводится основное и дополнительное образование по энергосбережению, устанавливается практика разработки стандартов энергосбережения и энергопотерь, вводится порядок энергоаудита предприятий, и финансируются мероприятия:

- а) По сокращению потребления свежего сырья и энергоресурсов;
- б) По комплексной переработке и использованию вторичной энергии и промышленно – бытовых отходов.

Часть 1

Основы эксергетического анализа аппаратурно-технологических схем.

Эксергетический анализ является разделом термодинамики и используется как прикладное выражение 2-го Начала термодинамики.

Вспомним 1-е Начало термодинамики:

Термодинамические процессы, в которых вырабатывалась или уничтожалась бы энергия – НЕВОЗМОЖНЫ.

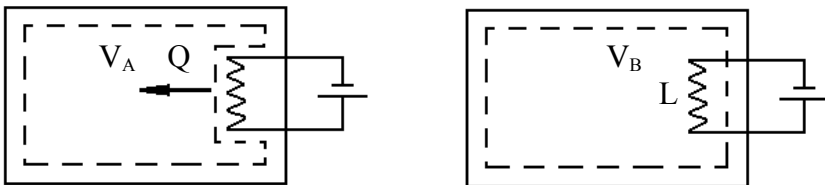
Термодинамический процесс выражается в равновесном изменении внутренней энергии системы (U) через передачу ей энергии в виде работы (L) или тепла (Q).

$$L_{12} + Q_{12} = U_2 - U_1 \quad (1)$$

Для неадиабатического процесса (обмен энергии с внешней средой протекает только через работу) т.е. $Q_{12} = 0$.

Различие адиабатической и неадиабатической систем можно проиллюстрировать следующим образом: В замкнутый объем

($V_A = V_B$) подводится энергия в виде тепла Q от электронагревателя (а) или работа электрического тока (L) вариант (б)



а) Неадиабатная система

б) Адиабатная система

Рис. 1

Разница состоит в том, что выделенная нами система (пунктир) не включает в себя (а) или включает в себя (б) электронагреватели.

Внутренняя энергия (U) характеризует состояние системы и определяется такими параметрами как температура (T), давление (P) или удельный объем, энтропия (S) и энтальпия (h).

Работа и тепло характеризуют процессы, ведущие к изменению внутренней энергии.

В прикладном плане 1-е Начало термодинамики можно сформулировать так: **для замкнутой системы сумма энергии и работы на входе, равна сумме энергии на выходе.**

$$\sum L_{\text{вх}} + \sum Q_{\text{вх}} = \sum L_{\text{вых}} + \sum Q_{\text{вых}} \quad (2)$$

Знак « + » - приход энергии или тепла;

Знак « - » - отток энергии или тепла.

Для перехода ко второму началу термодинамики рассмотрим следующий пример:

К выпарной установке (4) подводится тепло Q_1 имеющее температуру T_1 и отводится тепло Q_2 имеющее потенциал T_2 , а часть тепла теряется. (Q_n)

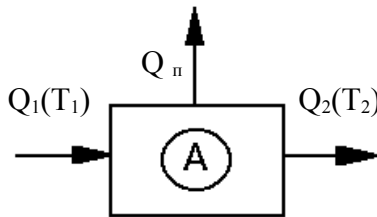


Рис. 2

Процесс выпарки идет при выполнении следующих условий:

$$T_1 \geq T_2 = T_{\text{исп}}$$

КПД процесса в этом случае будет равен:

$$\eta_r = Q(T_2) / Q(T_1) \quad (3)$$

$Q(T_2)$ – полезная энергия;

$Q(T_1)$ – затраченная энергия.

$$\eta_r = 1 - Q_n / Q_1 \quad (3-a)$$

При минимизации потерь ($Q_n \rightarrow 0$) тепловой баланс выпарной установки преобразуется из выражения (4) в выражение (5):

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{пот}} \quad (4)$$

$$Q_1 \approx Q_2 \quad (5)$$

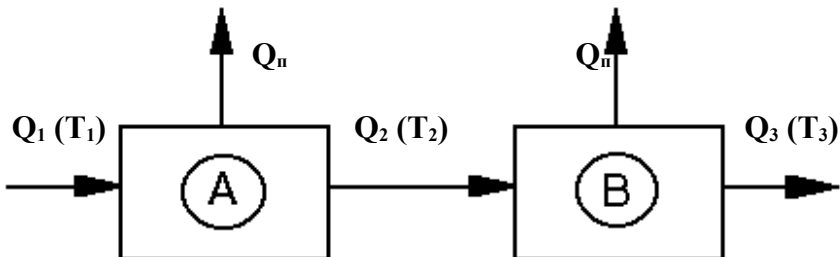


Рис. 3

Оценим возможность передачи тепла Q_2 (T_2) во второй аналогичный выпарной аппарат (В).

Невозможность проведения выпарки во втором аппарате (В) объясняется отсутствием градиента температуры между параметрами теплоносителя (T_2) и температурой испарения ($T_{исп}$), т.к. $T_2 \leq T_{исп}$.

Можно сделать вывод, что направление теплопередачи определяется «качеством» тепла, т.е. его температурой, давлением, энтальпией и энтропией.

Сформулируем Второе начало термодинамики:

- 1) Все естественные процессы необратимы;
- 2) Ряд процессов преобразования энергии возможен только в одном направлении. Например: к веществу находящемуся в емкости возможно подвести энергию в виде работы вала (мешалка), но никогда не удастся отвести механическую работу вращения вала из этой емкости.
- 3) Теплота передается в направлении уменьшения уровня температур (от горячего к холодному).

Параметром необратимости процесса является удельная энтропия (S)

$$dS = dQ / T \quad [кДж/кг \cdot K] \quad (6)$$

Мерой необратимости процесса служит изменение энтропии, которая для адиабатных процессов возрастает, а для обратимых процессов остается постоянной. Т.е. баланс энтропий в реальных процессах не существует.

$$(S_2 - S_1) > 0 \quad (7)$$

В прикладном плане Второе начало термодинамики удобно применять на основе эксергетического подхода.

Эксергия (E) – это энергия, которая при участии окружающей среды (ОС) может быть преобразована в любую другую форму энергии или работу полностью, т.е. на 100%.

Связь между энергией (Э) и эксергией (E) можно записать следующим образом:

$$\mathcal{E} = E + A \quad (8)$$

где, A – анергия, т.е. непреобразуемая часть энергии.

Некоторые виды энергии, например: электрическая, механическая, кинетическая, потенциальная представляют из себя стопроцентную эксергию и могут с КПД = 100 % быть преобразованы в тепловую или внутреннюю энергию.

Важное замечание: В общем случае эксергия потока вещества включает в себя термическую (E_T) кинетическую (E_K) и потенциальную (E_n) составляющие. В дальнейшем мы будем уделять основное внимание более «дина-

мичной» части эксергии потока – ее термической составляющей (без указания индекса). Это связано с тем, что для одноуровневых (высота $\approx \text{const}$) и стационарных (скорость $\approx \text{const}$) потоков энергоносителей.*

С другой стороны тепловая и внутренняя энергии, состоящие из эксергии и анергии, могут лишь частично преобразованы в работу, являющуюся «стройной», т.е. однонаправленной формой энергии.

Хаотическая по природе тепловая энергия при совершении работы поршня в направлении одной из координат может только на 1/3 преобразоваться в работу (движение вдоль X), т.е. тепло на 2/3 состоит из анергии.

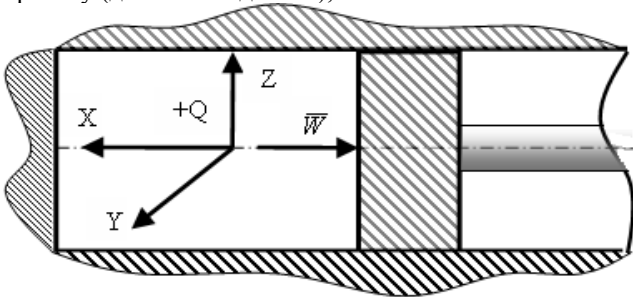


Рис. 4

Для расчета удельной эксергии (e) потока вещества, имеющего параметры T_n, P , используется следующая зависимость:

$$e_{т.р.} = h_{т.р.} - h_{о.с.} - T_{о.с.} (S_{т.р.} - S_{о.с.}) \quad (9)$$

где: $T_{о.с.}$ – температура окружающей среды (ОС) причем по шкале Кельвина.

* - Существенно, как правило, меняется только термическая составляющая эксергии.

Эксергия является параметром процесса, а не состояния т.е. существенно зависит от уровня параметров окружающей среды ($T_{о.с.}, P_{о.с.}$, химсостава ОС). Поэтому удельная эксергия (e) в отличие от энтальпии (h) и энтропии (S) не табулируется в термодинамических справочниках.

Для нахождения удельной анергии потока вещества:

$$a_{т.р.} = h_{о.с.} + T_{о.с.} (S_{т.р.} - S_{о.с.}) \quad (10)$$

Удельная эксергия (e) – есть максимально возможная работа, которая может быть получена при обратимом переходе энергосодержания одного кг вещества от заданных параметров температуры, давления в состояние окружающей среды.

С позиции эксергии Второй закон термодинамики может быть сформулирован так:

- 1) Во всех необратимых процессах эксергия ($E \rightarrow A$) переходит в анергию;
- 2) Эксергия остается постоянной только в обратимых процессах;

3) Превращение анергии в эксергию невозможно

С позиции эксергии термин «расход энергии» некорректен, так как противоречит Первому началу термодинамики.

В отличие от энтропии и энтальпии эксергия характеризует процесс перехода системы из данного состояния в состояние окружающей среды.

При параметрах системы (T , P) выше параметров окружающей среды (T_{oc} , P_{oc}) эксергия положительна. В противном случае эксергия может принимать отрицательное значение, т.е. окружающая среда будет совершать работу над нашей системой.

Фактор окружающей среды (ОС).

Окружающая среда характеризуется прежде всего тем, что ее параметры не зависят от параметров (температура, давление, химический состав) рассматриваемой системы. В качестве окружающей среды, как правило, принимается:

- атмосфера Земли;
- морская вода;
- космическое пространство;
- литосфера Земли.

Окружающая среда – есть неограниченно большая масса вещества, находящегося в инертном равновесии, для которого интенсивные параметры (T_{oc} , P_{oc}) остаются неизменными независимо от отдачи или восприятия ею энергии или вещества.

Окружающая среда – есть система неограниченной энергоемкости, не могущей в то же время быть источником эксергии.

К примеру, если можно было бы полезно использовать тепловую энергию содержащуюся в мировом океане при охлаждении его всего на 1°C , то человечество получило бы в 1000000 раз больше, энергии, чем дают все электростанции Мира.

При равных параметрах интенсивности системы и окружающей среды численные значения удельной эксергии будут определяться только химсоставом рабочего тела и химсоставом окружающей среды.

К примеру, химический состав дымового газа близок к химическому составу атмосферы, и для расчета его удельной эксергии допустимо брать параметры h и S для воздуха. При работе с водой или водяным паром параметры окружающей среды и рабочего тела берутся из термодинамических таблиц для воды.

При выборе состава окружающей среды для расчета химико-технологических процессов, особенно, при участии в реакции твердых веществ, целесообразно принимать максимально инертные их модификации. К примеру для реакций с участием железа, которое может находиться в 4-х модифика-

циях (Fe , FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) в качестве состава окружающей среды целесообразно принять магнетит (Fe_3O_4). В этом случае эксергия всех соединений железа (при $T_{oc}=\text{const}$, $P_{oc}=\text{const}$) будет положительна.

Влияние конкретных параметров окружающей среды известного состава можно проиллюстрировать в виде $T - S$ диаграммы.

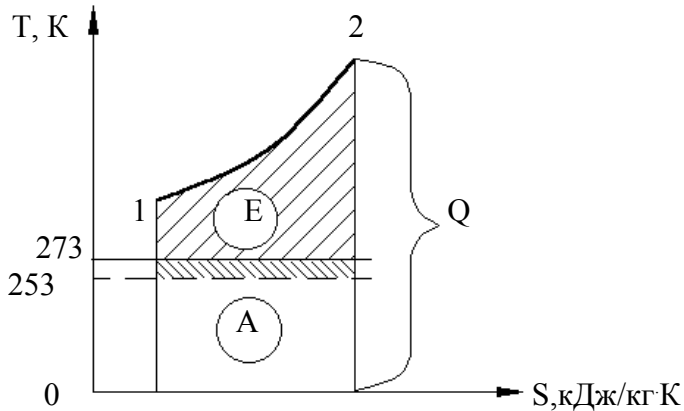


Рис.5

К примеру, при принятии T_{oc} в первом случае 293 К ($t=+20^\circ\text{C}$), а во втором 253К, то доля эксергии в теплосодержании (Q) возрастает.

В этой связи, сравнивать энергетическую эффективность процессов по уровню эксергетического КПД (η_e) корректно при одинаковом уровне параметров окружающей среды (T_{oc} , P_{oc}). Если T_{oc} , как правило, зависит от климата и времени года, то в качестве давления, как правило, принимают давление окружающей среды на уровне моря, т.е. $P_{oc}=100$ кПа.

Расчет эксергетического КПД.

Инженерная задача при эксергетическом анализе состоит в проведении процесса с минимальными потерями эксергии или в создании определенной технологической цепочки с максимальным суммарным эксергетическим КПД.

Суммарный эксергетический КПД (η_e) рассчитывается как отношение, суммы выходящих потоков энергии к входящим:

$$\eta_e = \frac{\sum E_{вых}}{\sum E_{вх}} \quad (11)$$

В данной формуле применяется не удельная эксергия (e), а поток эксергии (E) в двух вариантах.

$$E = e m \text{ (кДж)} \quad (12)$$

$$E = e G \text{ (кВт)} \quad (12 \text{ а})$$

*Эксергетический КПД в отличие от технического (теплого) КПД определяет принципиально достижимое совершенство процесса при заданных условиях окружающей среды.

Получить технический или тепловой КПД процесса выше эксергетического принципиально невозможно. Общий эксергетический КПД процесса или аппарата отражает долю сохраненной работоспособности он может быть представлен как сумма целевых эксергетических КПД. Иногда для совершенствования процесса провести анализ целевого эксергетического КПД более целесообразно, чем общего.

$$\eta_e = \frac{\sum E_{вых}}{\sum E_{вх}} = \frac{E_{1вых}}{\sum E_{вх}} + \frac{E_{2вых}}{\sum E_{вх}} + \dots + \frac{E_{nвых}}{\sum E_{вх}} \quad (13)$$

* где m [кг] и G [кг/сек] - масса и массовый расход соответственно.

Эксергия тепла

При передаче тепла от тела с температурой T_B к телу с температурой T_A происходит уменьшение эксергии тепла, т.к. $(T_B - T_{oc}) > (T_A - T_{oc})$

Эксергию тепла можно определить по следующей формуле:

$$E = (1 - T_{oc} / T) Q \quad [\text{кВт, кДж}] \quad (14)$$

где коэффициент $(1 - T_{oc} / T)$ отражает степень работоспособности тепла при переходе его в состояние ОС и носит название фактор Карно (η_c).

$$\eta_c = 1 - T_{oc} / T \quad (15)$$

Фактор Карно отражает максимально достижимую долю работоспособной энергии, содержащейся в тепле при температуре T и окружающей среде T_{oc} .

Результаты расчета фактора Карно от уровня температур процесса (T) и ОС (t_{oc}) по шкале Цельсия) представлены в таблице 2.

$t_{oc}, ^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$			
	100	200	600	1000
0	0,268	0,4227	0,6872	0,7856
20	0,2144	0,3804	0,6644	0,7697
60	0,107	0,2959	0,6185	0,7383

Очевидно, что «качество» тепла растет с увеличением температуры энергоносителя и снижением температуры окружающей среды. Уровень температуры (OC) особенно существенен для сравнительно низкотемпературных энергоносителей ($300-200\ ^\circ\text{C}$)

С позиции утилизации тепла в промышленности вторичные энергоресурсы подразделяют на низко- и высокопотенциальные.

К низкопотенциальному теплу, как правило, относят тепловые потоки с температурой ниже $100\ ^\circ\text{C}$.

С помощью фактора Карно (η_e) можно оценить степень совершенства теплового процесса как:

$$\eta_e = \frac{T}{T_e}$$

Пример: Одинаковую полезную работу можно произвести:

- а) электродвигателем с $\eta_r = 62\%$;
- б) двигателем внутреннего сгорания (ДВС) с $\eta_r = 28\%$.

Какой привод менее совершенен?

а) для электродвигателя: $\eta_e = \frac{62\%}{100\%} = 0,62\%$

б) для ДВС ($t_{oc} = 20^\circ\text{C}$; $t = 200^\circ\text{C}$), для тепловых двигателей η_e соответствует фактору Карно (см таблицу 2) около 38% :

$$\eta_e = \frac{28\%}{38\%} = 0,74\%$$

Вывод: термодинамически менее совершенен электродвигатель, т.к. он использует только 62% возможного потенциала преобразования эксергии против 74% у ДВС.

Эксергетическая ценность тепла при повышении температуры теплоносителя отражается в его цене.

К примеру в США:

- тепло при 1000°C имеет условно $\eta_e = 77\%$ и стоимость $50,4\ \$$ за гигакалорию,

- при температуре 200°C η_e близок к 30% при стоимости тепла 25 \$ за гигакалорию,
- при 40°C ($\eta_e = 6,4\%$) при цене 4,2\$ за гигакалорию.

При использовании низкопотенциального тепла, максимальный эксергетический КПД процесса реализуется при максимальном приближении входной температуры к температуре окружающей среды.

Эксергия тепла зависит не только от температурных факторов, но и от типа энергоносителя, главным образом от удельной энтальпии последнего.

Если обозначить долю эксергии в теплосодержании через Ψ ($\Psi = e / h$), то при температуре 100°C этот параметр для воды будет равен 0,1577, а для воздуха 0,0408.

Это означает, что один килограмм газообразного энергоносителя типа воздух содержит в 4 раза меньше эксергии, чем 1 кг воды при тех же температурах.

Потери эксергии и эксергетический баланс .

В аппарат входит энергия, состоящая из анергии и эксергии:

$$\Theta = A_{\text{вх}} + E_{\text{вх}}$$

Входная анергия транзитом проходит через аппарат. Увеличение анергии на выходе происходит за счет потерь эксергии (D_E).

$$A_{\text{вых}} = A_{\text{вх}} + D_E$$

Запишем энергетический (а) и эксергетический (б) балансы и выразим их графически (рис 6) в соответствующем масштабе:

а) $A_{\text{вх}} + E_{\text{вх}} = A_{\text{вых}} + E_{\text{вых}}$

б) $E_{\text{вых}} = E_{\text{вх}} - D_E$

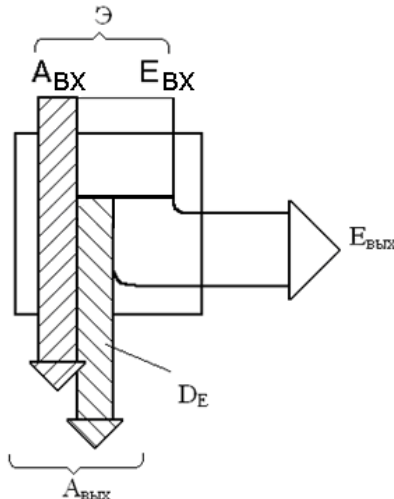


Рис.6

При построении эксергетических диаграмм в дальнейшем мы будем исключать входные потоки энергии, рассматривая только эксергию (E) и ее потери (D_E).

Задачей эксергетического анализа является организация процесса с минимальными потерями эксергии. ($D_E \rightarrow \min$)

Удельные потери эксергии для перехода вещества из состояния 1 в состояние 2 можно представить (на основе формулы 9) как:

$$de = h_2 - h_1 + T_{oc}(S_2 - S_1) \quad (16)$$

Потери эксергии целесообразно подразделять на собственные и технические.

Для закрытых систем (непроницаемых для материальных потоков) собственные потери эксергии определяются только термодинамическими параметрами ОС и технологических сред. Эти потери в рамках заданных технологических параметров принципиально неустраняемы.

Технические потери эксергии, т.е. рассеяние эксергии в виде теплопотерь, утечек сред, из-за несовершенства теплообмена в аппаратах, технически устранимы в рамках заданных параметров процесса (температура, давление, расход).

Для теплообмена однородных систем, эксергетические потери при теплопередачи ($T_B > T_A$) можно записать как в виде функции теплового потока (Q):

$$D_E = T_{oc} \cdot \frac{T_B - T_A}{T_B \cdot T_A} \cdot Q \quad (17)$$

Из формулы (17) видно, что потери эксергии пропорциональны не только разности температур энергоносителей ($T_B - T_A$), но и обратнопропорциональны произведению абсолютных температур, ($T_B \cdot T_A$) т.е. потери эксергии зависят от температурного уровня энергоносителей, что неочевидно.

Реализация одинакового градиента температур ($T_B \rightarrow T_A$) для низкотемпературного (низкопотенциального) тепла сопряжена с ростом уровня потерь эксергии*. Для минимизации D_E необходимо увеличивать площади теплопередающих поверхностей, а следовательно, габариты и металлоемкость теплообменников.

Расчетные формулы для потоков эксергии.

Вид расчетных формул для энтропийных и неэнтропийных потоков эксергии принципиально различны. Наиболее просто определяются неэнтро-

пийные потоки эксергии, которые являются (по определению) 100% эксергией, в частности:

1) Электроэнергия:

$$N_{эл} = IU \text{ [кВт]} \quad (18)$$

$$\text{или: } N_{эл} = N_{теор} / \eta_T \text{ [кВт]} \quad (18a)$$

где: $N_{теор}$ – расчетная мощность, необходимая для проведения термодинамического процесса. В частности, при перекачивания несжимаемых сред:

$$N_{теор} \text{ [кВт]} = G \text{ [нм}^3/\text{с]} \cdot \Delta P, \text{ [кПа]} \quad (18 б)$$

* т.к. в этом случаи знаменатель в формуле (17) существенно меньше, чем при том же градиенте температур для высокотемпературных теплоносителей

2) Кинетическая энергия:

$$E_{кин} = G \cdot W^2 / 2, \text{ [кВт]} \quad (19)$$

где: G - массовый расход [кг/с]

W - скорость среды [м/с]

3) Работа силы

$$L = F \cdot S \cdot \cos(\bar{F} \wedge \bar{L}) \quad \text{[кДж]} \quad (20)$$

где: F – сила в [кН]

S – расстояние перемещения точки приложения силы в [м]

4) Потенциальная энергия:

$$E_{п} = m \cdot g \cdot \Delta Z \quad \text{[кДж]} \quad (21)$$

где: ΔZ – разность высот [м]

Эксергия топлив.

Эксергия топлив (e) является функцией нормальной теплоты сгорания (ΔH_r) и зависит от соотношения углерода (C) и водорода (H), а также от наличия серы и инертных примесей в твердом топливе.

Для газообразных и жидких углеводородов существуют зависимости (22) и (23) соответственно :

$$e / \Delta H_r = 1,00344 + 0,0183 \cdot H/C - 0,0694 \cdot 1/C \quad (22)$$

$$e / \Delta H_r = 1,0406 + 0,0144 \cdot H/C \quad (23)$$

где, H/C – соотношение атомных чисел водорода и углерода;

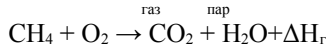
C – среднее количество атомов углерода в смесевом газе;

ΔH_r – высшая теплотворная способность топлива.

В справочниках приводится в качестве теплотворной способности углеводородных топлив 2 величины:

а) «высшая» теплотворная способность, полученная с учетом конденсации паров воды;

б) «низшая» теплотворная способность, полученная в условиях отсутствия конденсации паров воды из дымовых газов.



В формулах для расчета эксергии топлив (22) и (23) в качестве теплотворной способности должна стоять высшая теплотворная способность. На практике это реализуется при температуре дымового газа не более 60-80° С

К примеру: теплотворная способность метана -892 кДж/моль. Найдем энтальпию сгорания в массовом эквиваленте (кДж/кг): $892 / 16 \cdot 10^{-3} = 55750$ кДж/кг

Для твердых топлив (из-за наличия инертных примесей) в справочниках приводится средняя теплотворная способность (иногда в виде диапазона энтальпий сгорания.)

В первом приближении эксергию органических топлив можно принимать равной высшей теплотворной способности.

$$e / \Delta H_f \approx 1$$

Эксергии сред, зависящих от энтропии.

Для потока вещества заданного химического состава (для i-го компонента) и при постоянном значении давления и температуры удельная эксергия рассчитывается по известной зависимости (9):

$$e_i = h - h_{0,c} - T_{0,c} (S - S_{0,c}) \quad (24)$$

Приведенная формула удобна для расчета эксергии для нереагирующего потока вещества и при наличии таблиц термодинамических свойств с заданными значениями параметров (Т, Р).

Для смесей нереагирующих газов параметром смеси служит x_i – массовая доля i-го компонента.

Например для воздуха:

$$X_{\text{O}_2} = 0,21; X_{\text{N}_2} = 0,78; X_{\text{Ar}} = 0,01.$$

В этом случае удельные параметры смеси (h и S) рассчитываются по формулам (25) для соответствующих значений Р и Т

$$h_{\text{см}} = \sum h_i \cdot x_i \quad (25a)$$

$$S_{\text{см}} = \sum S_i - R \cdot \sum x_i \ln x_i \quad (25б)$$

где, $R = R_0 / \mu_{\text{см}}$ – газовая постоянная

μ – молекулярная масса смеси;

R_0 – универсальная газовая постоянная.

Как известно, в термодинамических расчетах энтальпия подчиняется закону аддитивности, а энтропия нет.

На основе формул (25а) и (25б) мы можем рассчитать эксергию смеси нереагирующих компонентов при заданных значениях Р, Т и ОС.

Для сжимаемых газов в изотермическом процессе, если известны начальные энтальпии (h_1) и энтропии (S_1), конечные параметры можно рассчитать по формулам (26) :

$$h_{P_2,T} = h_{P_1,T} \quad (\text{при } T < T_{\text{дис}}) \quad (26 \text{ а})$$

$$S_{P_2,T} = S_{P_1,T} - R \cdot \ln (P_2 / P_1) \quad (26 \text{ б})$$

Формулы эксергии для изотермического процесса применимы для определения потерь эксергии в газодувках, насосах и компрессорах (при минимальной степени сжатия или идеальной работе межступенчатых холодильников).

Для случая изобарического нагрева конечные энтропии или энтальпии могут быть найдены по формулам (27):

$$h_{T_2,P} = h_{T_1,P} + \int_{T_1}^{T_2} Cp \cdot dT \quad (27 \text{ а})$$

$$S_{T_2,P} = S_{T_1,P} + \int_{T_1}^{T_2} \frac{Cp(T)}{T} \cdot dT \quad (27 \text{ б})$$

Если в процессе охлаждения – нагрева сред допустимо принять $Cp = \text{const}$, то формулы (27) упрощаются:

$$h_{T_2,P} = h_{T_1,P} + Cp(T_2 - T_1) \quad (28 \text{ а})$$

$$S_{T_2,P} = S_{T_1,P} + Cp \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (28 \text{ б})$$

Если в процессе меняются одновременно Т и Р, то параметры энтальпии и энтропии рассчитывают по выше приведенным формулам последовательно.

При совместном изменении Т и Р иногда проще найти необратимые потери эксергии (D_e) в конкретном аппарате.

Например, при сжатии газа:

$$\Delta S_{\text{необр.}} = Cp \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{R_0}{\mu} \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (29)$$

$$D_E = T_{\text{ос}} \cdot G \cdot \Delta S_{\text{необр}} \quad (30)$$

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вых}} + D_E \quad (31)$$

При теплообмене двух сред (А и В), как правило, известен тепловой поток Q. Примем, для определенности, что среда (В) греет среду (А). В этом случае:

$$\Delta S_{\text{необр}} = \Delta S_{\text{необр}}^A + \Delta S_{\text{необр}}^B \quad (32)$$

$$D_E = T_{\text{oc}} (G_A \cdot \Delta S_{\text{необр}}^A + G_B \cdot \Delta S_{\text{необр}}^B) \quad (30a)$$

где: $\Delta S_{\text{необр}}^A$ и $\Delta S_{\text{необр}}^B$ рассчитываются по формуле (29).

Если одна из сред несжимаема как например, для схемы калорифера (см.рис. 10), где горячая вода (В) греет воздух (А), то величину потерь энтропии можно рассчитать проще:

$$\Delta S_{\text{необр}} = \Delta S_{T/O} + \Delta S^A(P) + \Delta S^B(P) \quad (32a)$$

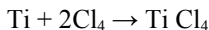
$$\text{где: } \Delta S_{T/O} = \frac{T_B + T_A}{T_B \cdot T_A} \cdot Q, \quad (\text{аналогично выражению 17})$$

$$\Delta S^A(P) = R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{и} \quad \Delta S^B(P) = 0 \quad (\text{для несжимаемой среды})$$

В результате использования приведенных зависимостей мы можем рассчитать потоки эксергии в отсутствии химической реакции практически для всех аппаратов, а так же найти индивидуальные потери эксергии и эксергетический КПД.

Для расчета эксергии при химических реакциях используются параметры энтропии и энтальпии для реагирующих веществ, а также тепловой эффект реакции [4.5].

Для определения удельной эксергии химического соединения по эксергии элементов входящих в него запишем на примере конкретной реакции получения четыреххлористого титана из элементов, термодинамические параметры которых известны:



В этом случае:

$$e_{\text{TiCl}_4} = 1 \cdot e_{\text{Ti}} + 4e_{\text{Cl}_4} + \Delta Rg, \quad (33)$$

где:

$$\Delta Rg = \Delta H_p - T_{\text{oc}} \cdot \Delta S_{\text{oc}}$$

ΔH_p – тепловой эффект реакции;

$$\Delta S_{\text{oc}} = (S_{\text{Ti}})_{\text{oc}} + 4(S_{\text{Cl}_4})_{\text{oc}} - (S_{\text{TiCl}_4})_{\text{oc}}$$

Методика построения эксергетических диаграмм.

Рассмотрим указанную методику на примере построения эксергетической диаграммы установки для нагрева воздуха при подаче его в помещение. (рис 7)

Указанная установка содержит адиабатическую воздуходувку (1) и кожухотрубчатый теплообменник (2) нагревающий воздух горячей водой, поступающей из котла (4), нагнетаемой насосом (5) из открытого водоёма.

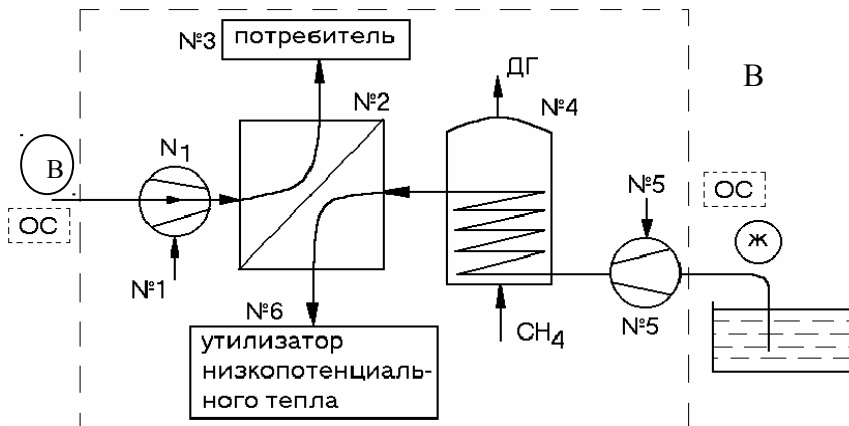


Рис 7.

Рис. 7. отражает аппаратурно-технологическую схему калорифера (установки для подачи и нагрева воздуха на входе в помещение). На этой схеме целесообразно проставить известные параметры расхода и температуры на входе и выходе из каждого аппарата.

Запишем исходные данные:

Поток воздуха нагревается из состояния окружающей среды до температуры 55°C , на входе в помещение (3). Температура окружающей среды равна 12°C . Подвод тепловой энергии к воздуху осуществляется частично в адиабатической воздуходувке мощностью $N_1 = 4,42 \text{ кВт}$ и в рекуперативном теплообменнике водой, имеющей начальную температуру 70°C при расходе $0,467 \text{ кг/с}$. Заданный расход воздуха $= 1,1 \text{ кг/с}$.

Для построения эксергетической диаграммы целесообразно перейти от аппаратурной схемы (рис.7) к схеме потоков эксергии в форме графов (рис 8), сохранив нумерацию элементов исходной схемы.

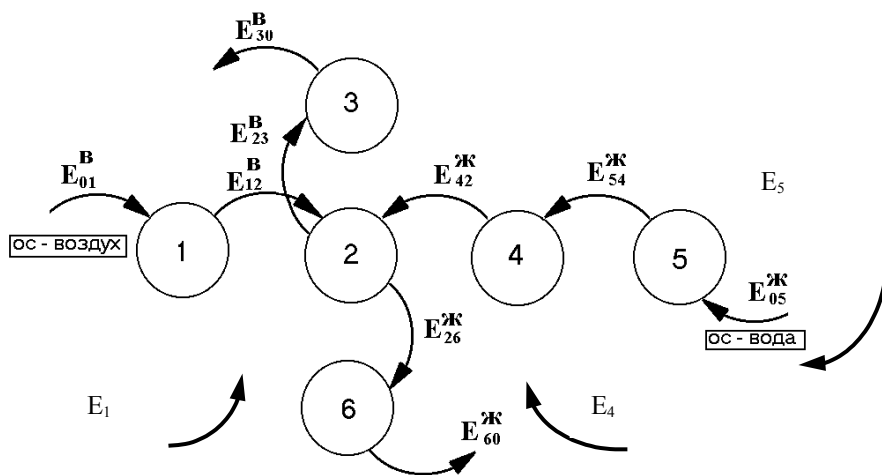


Рис 8.

На схеме (8) потоки эксергии обозначаются в виде стрелок с двумя индексами внизу. Первая цифра - номер аппарата, откуда выходит эксергия, вторая - куда входит; Окружающей среде присваивается номер «ноль». Если в технологическом процессе принимают участие энергоносители разного состава, (например: воздух, вода, аммиак, масло, и т. д.) то сверху значка (E) можно указать обозначение среды например, (E^*) (для жидкости), и E_B (для воздуха).

На основе схем 7 и 8 выполняется эксергетическая диаграмма процесса (рис. 9) в некотором графическом масштабе, где величина потока эксергии соответствует «ширине» стрелки E или D_E , причем потери эксергии штрихуются.

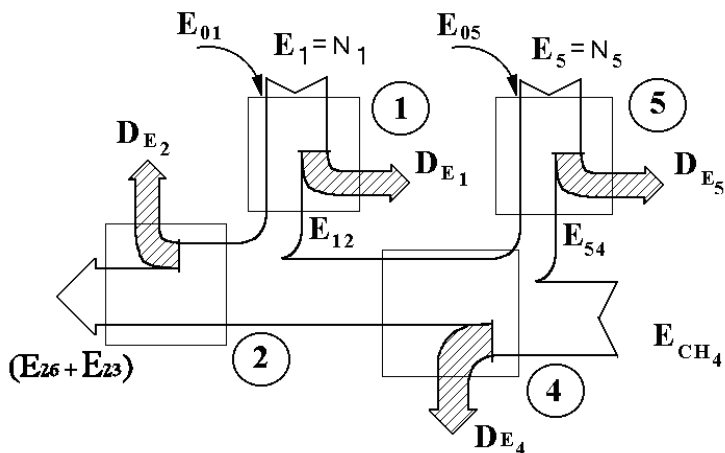


Рис. 9

Входная эксергия воздуха и воды изображается линией нулевой толщины (при равенстве начальной температуры энергоносителей температуре окружающей среды).

Эксергии E_1 и E_5 отражающие мощности электропривода воздуходувки и насоса, расходуются на преодоление гидравлических сопротивлений котла и теплообменника. Эксергии E_{12} и E_{54} отражают эксергию давления воздуха и воды соответственно. Нагрев воздуха (E_{23}) осуществляется за счет подвода эксергии природного газа (E_4) в котле (4).

$$\eta_e = \frac{\sum \overset{\text{в}}{E_{23}} + \overset{\text{ж}}{E_{26}}}{N_1 + N_5 + E_{\text{сн } 4}} - \text{Общий эксергетический КПД схемы}$$

Целевой эксергетический КПД: отражает только уровень «полезного» использования затраченной эксергии на нагрев воздуха учета возможной утилизации тепла отводимой в блок (6) воды:

$$\eta_{\text{цел}} = \frac{\overset{\text{в}}{E_{23}}}{(N_1 + N_5 + E_4)}$$

На основе анализа эксергетических диаграмм можно сделать следующее:

- 1) Провести объективную сравнительную оценку уровня энергопотерь в аппаратах и по схеме в целом.
- 2) Определить элементы схемы, наиболее целесообразные для энергетического совершенствования (через снижение потерь эксергии)

- 3) Выполнить численный перебор вариантов изменения режимов работы аппаратов и схемы в целом (без экспериментального моделирования).
- 4) Провести оптимизацию вариантов компоновки, оборудования (порядок установки теплообменников, насосов, тепловыделяющих элементов) в рамках заданной схемы и параметров процесса.

Для детальной оценки структуры потерь эксергии в каждом аппарате общие потери (D_E , рис. 9) целесообразно разбить:

- а) по типам сред (вода и воздух);
- б) по потерям эксергии давления;
- в) по потерям эксергии от теплообмена.

Для этого выполним следующее:

- выделим из общей схемы калорифера (рис.7) два основных аппарата: воздухоподувку (1) и теплообменник (2) .

- рассмотрим другие возможности расчета потерь эксергии через анализ эксергетического баланса и баланса энтропии.

Выделенный фрагмент схемы (рис.10) обозначим параметрами процесса, полученными из расчета энергетических балансов отдельных аппаратов.

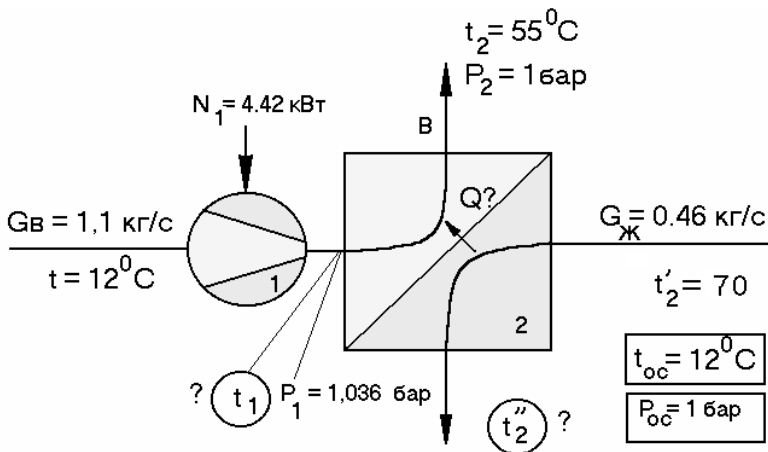


Рис 10.

Для упрощения расчетов воду считаем несжимаемой и не теряющей давления в пространстве теплообменника (гидравлическим сопротивлением пренебрегаем).

Примем: $C_p^B = 1,004 \text{ кДж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ и $C_p^{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж/кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$

Вначале, составляя энергетические балансы отдельно для аппаратов, найдем недостающие параметры (t_1 , Q , t_2)

Запишем энергетический баланс адиабатической воздуходувки:

$$N_1 = G_B (h_1' - h_1) = G_B \cdot C_p^B (t_1' - t_1)$$

Отсюда? $\Delta t = 4.42 / (1.1 \cdot 1.004) \approx 4 \text{ } ^\circ\text{C}$

В результате: $t_1' = 12 + 4 = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$

Для расчета производительности теплообменника запишем количество тепла; отводимого воздухом;

$$Q = G_B \cdot C_p^B (t_2 - t_1') = 1,1 \cdot 1,004 \cdot (55 - 16) = 43,1 \text{ кВт}$$

Для нахождения температуры воды на выходе по известной мощности теплопередачи Q:

$$Q = G_{\text{ж}} \cdot C_p^{\text{ж}} (t_2'' - t_2')$$

$$t_2'' = t_2' - \frac{t_2' - Q}{(G_{\text{ж}} \cdot C_p^{\text{ж}})} = 70 - \frac{43,1}{0,46 \cdot 4,19} = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Затем, преобразуем (рис. 10) в схему графов:(рис. 11)

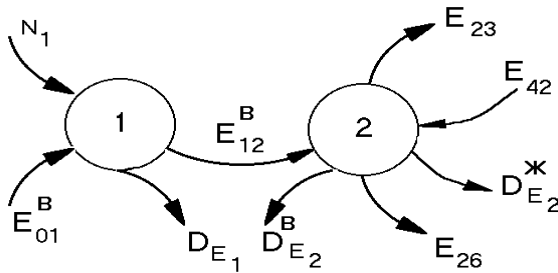


Рис. 11

В результате можно построить в масштабе эксергетическую диаграмму указанных блоков 1 и 2. (рис. 12)

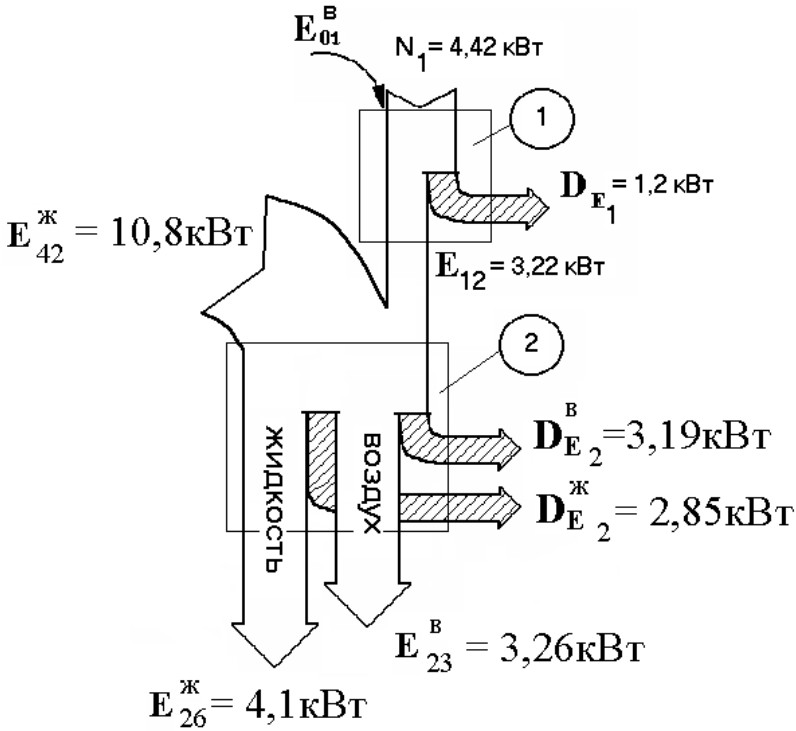


Рис. 12

Потоки эксергии, указанные на диаграмме, получены следующим образом:

- 1) E_{42} , E_{26} , E_{23} , E_{12} получены по значениям температур и давлений через удельную эксергию по формуле (12а)
- 2) $D_{E1} = N_1 - E_{12}$
- 3) Потери эксергии D_{E2}^B и $D_{E2}^Ж$ найдены по формулам (29÷32)

$$\Delta S_{необр} = \Delta S^B + \Delta S^{Ж} = G_B \left(Cp \cdot \ln \frac{T_2^B}{T_1^B} - R \cdot \ln \frac{P_2^B}{P_1^B} \right) + G_{Ж} \cdot Cp \cdot \ln \frac{T_2^{Ж}}{T_1^{Ж}} =$$

$$= 1,1(1,004 \cdot \ln(328,15/289,15) - 0,287 \cdot \ln(1,000/1,036) +$$

$$0,467 \cdot 4,19 \cdot \ln(321,15/289,15)) = 0,0212 \text{ кВт} / \text{К} = 21,2 \text{ Вт} / \text{К}$$

Численно оценив общий и частный эксергетические КПД (на основе полученной диаграммы (рис. 12) имеем:

Для схемы (рис.10): $\eta_{e\Sigma} = (E_{23} + E_{26}) / (E_{42} + N_1) = 0.504$

Для воздуходувки (1): $\eta_{e1} = E_{12} / N_1 = 1 - D_{E1} / N_1 = 0.728$

Для теплообменника (2): $\eta_{e2} = (E_{26} + E_{23}) / (E_{12} + E_{42}) = 0.52$

$$\text{Целевой } \eta_e = \frac{E_{26}}{(E_{12} + E_{42})} = 0,23$$

Как видно, общий сравнительно низкий эксергетический КПД, (0,504) лимитируется не на стадии адиабатического сжатия (η_{e1}), а на стадии теплообмена (η_{e2}).

В связи с тем что поток эксергии отводимой водой (E_{26}), как правило не используется, можно считать что теплообмен организован неоптимально для целевого процесса (нагрева воздуха). Для увеличения содержания эксергии в целевом продукте (воздух) целесообразно перераспределение эксергии отходящей воды к воздуху путем увеличения поверхности теплопередачи и интенсификации теплообмена. В то же время газодинамический режим оптимален ($E_{12}^B \approx D_{E2}^B$).

Таким образом, на основе анализа эксергетических диаграмм процессов в аппаратах, можно не только определять предельные уровни потерь эксергии раздельно по термической, кинетической и потенциальной составляющим, но и определять рациональные пути повышения эксергетического КПД, как отдельного аппарата, так и технологической схемы.

Итоговые сопоставления энергии и эксергии.

ЭНЕРГИЯ	ЭКСЕРГИЯ
Энергия зависит от параметров системы, и не зависит от параметров окружающей среды.	Эксергия зависит от параметров системы и от параметров окружающей среды.
Энергия всегда положительна.	Эксергия может быть равной нулю (при равновесии с окружающей средой) и быть отрицательной, если температура и давление выше аналогичных параметров системы.
Энергия подчиняется закону сохранения в любых процессах.	Эксергия подчиняется закону сохранения только в обратимых (идеальных) процессах. В реальных только расходуется.
Превращение одних форм энергии в другие ограничивается Вторым законом термодинамики для всех процессов, включая обратимые.	Превращение одних форм эксергии в другие не ограничено Вторым законом термодинамики.

Анализ химико-технологических систем. (ХТС)

В этом разделе мы должны рассмотреть принципы анализа, синтеза и оптимизации ХТС применительно к задачам энергоресурсосбережения. / 6,7,8/

ХТС – это целенаправленная совокупность процессов, аппаратов и машин, обеспечивающая проведение требуемых технологических операций (химических и физических) по переработке сырья в конечный целевой продукт.

Основной подсистемой ХТС является химико-технологический процесс (ХТП). ХТП – это совокупность технологических операций, позволяющих получать целевой продукт из исходного сырья.

ХТП черпает из окружающей среды эксергию и вещества, и отдает окружающей среде вторичные материалы, отходы и вторичную энергию.

Элементами ХТП являются:

- химические процессы;
- процессы тепло- массообмена;
- гидромеханические процессы;
- электротермические процессы и т. п.

Анализ единичных процессов (элементов ХТП) позволяет разрабатывать технологический режим, как совокупность параметров, определяющих условия работы аппарата в составе технологической схемы.

Вершиной ХТП является химическая реакция. Химические реакции можно классифицировать следующим образом:

1. Гомогенные и гетерогенные (по фазовому составу);
2. Простые и сложные (по механизму);
3. Моно - , би - , тримолекулярные реакции;
4. Каталитические и некаталитические;
5. Экзотермические и эндотермические.

Замечание: Катализаторы (в аспекте энергосбережения) являются материалом, снижающим энергетические параметры проведения процесса (температура, давление), концентрации, время процесса.

Системный подход в химической технологии предполагает взаимосвязь ХТП входящих в ХТС для обеспечения новых свойств ХТС, отсутствующих у отдельных ХТП.

ХТС классифицируют следующим образом:

- 1) Непрерывный ХТС (крупнотоннажное производство аммиака, минеральных кислот, ацетилена и др.);
- 2) Непрерывно-периодические ХТС (многоассортиментное производство органических продуктов, лакокрасочных материалов, растворителей и тд);
- 3) ХТС периодического действия;

- 4) Индивидуальное ХТС (выпуск индивидуальных партий продукции с последующей перенастройкой процесса: реактивы, лекарства и тд).

При создании целевых ХТС во главу угла ставятся критерии эффективности (КЭ), отражающие различные стороны физико-химической оптимизации основных этапов процесса (степень превращения исходных реагентов, выход продукта, селективность, производительность и интенсивность процесса). Из перечисленных КЭ при анализе и синтезе конкретных ХТС выбираются параметры, определяющие комплексную эффективность процесса. Иногда в виде системы 2 – 3 определяющих критериев.

При разработке научных основ создания химических производств и химико-энергетических объектов используют 4 основных принципа синтеза ХТС:

- а) Декомпозиционно-поисковый (ДП);
- б) Эвристическо - декомпозиционный (ЭД);
- в) Интегрально-гипотетический (ИГ);
- г) Эволюционный (ЭП).

Декомпозиционно-поисковый. (ДП)

ДП –формализация функциональной декомпозиции, т.е. дробление сложного объекта на более простые.

Сначала проектировщики делят комплексное химическое производство на подсистемы (ХТП, энергетические процессы, транспортные операции, операции управления), а затем каждая подсистема сводится к уровню элементарных процессов и аппаратов. Т.е. вместо комплексной задачи решается несколько подзадач. Причем требования к уровню эффективности решения подзадач формулируются исходя из общих критериев эффективности синтезируемой ХТС.

Этот принцип удобен для работы большой проектно-конструкторской организации, имеющей узкоспециализированные отделы.

Эвристическо-декомпозиционный.(ЭД)

Принцип основан на выборе наиболее удачных вариантов решения задач ХТС без полного перебора возможных альтернативных вариантов. Метод основан на опыте и интуиции исполнителей и базируется на доверии к высококвалифицированному инженерному составу. Метод удобен при совершенствовании уже существующих базовых ХТС.

Интегрально-гипотетический. (ИГ)

ИГ-принцип подразумевает создание простейшей ХТС, являющейся произвольным решением синтеза.

Он базируется на компьютерной оптимизации ХТС и оформлением подсистемных ХТС с применением следующего алгоритма:

- разработка альтернативных вариантов технологических схем ХТС
- создание гипотетически-обобщенной технологической структуры (ГОТС №1);
- анализ ГОТС №1;
- вычленение из ГОТС некоторой оптимальной технологической схемы ХТС в результате решения задач оптимизации ГОТС по различным критериям эффективности.
- создание ГОТС №2 и т.д.

Эти этапы циклически повторяются до тех пор пока не будет найдено решение исходной задачи синтеза ХТС при заданном уровне критериев эффективности. Метод удобен при отсутствии аналогов базовых ХТС, и не возможен без наличия искусственного интеллекта.

Эволюционный принцип. (ЭП)

На первом этапе анализируется существующее производство, аналог проектируемой ХТС. На втором этапе определяются общие и частные коэффициенты эффективности, выделяются «узкие места», где КЭ очень низок и проводится коррекция:

- а) структуры технологических связей;
- б) аппаратного оформления подсистем.

После модернизации «узкого места» производится его стыковка с общей ХТС и повторяется анализ эффективности для поиска новых «узких мест».

Метод удобен при совершенствовании (реконструкции) производства без коренной ломки структуры ХТС и входящих в нее ХТП.

Приемы ресурсоэнергосбережения в ХТС.

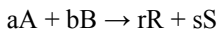
Ресурсоэнергосбережение в ХТС закладывается при проектировании и отслеживании, при эксплуатации ХТС через систему критериев эффективности. Нам известны энергетические критерии эффективности: эксергетический КПД; технический КПД (механический, тепловой, химический и т. д.); $\cos\varphi$ (φ – угол между суммарной нагрузкой и ее активной составляющей).

Подробно рассмотрим технологические критерии эффективности:

- а) степень превращения реагентов (ϵ).

- б) выход продукта (γ).
- в) селективность (φ).
- г) производительность (Π).
- д) интенсивность процесса (ω).

Формулировку критериев запишем на примере следующей необратимой реакции:



где, А и В – исходные реагенты. (А - основной реагент)
R и S – продукты реакции. (R – целевой продукт)

Кроме того, в процессе могут участвовать инертные компоненты (Д) не участвующие в химическом превращении, но требующие дополнительных затрат на транспортировку, измельчение, перемешивание и т. д.

Степень превращения (ε) - это доля основного исходного реагента, используемая на химическую реакцию.

$$\varepsilon_A = \frac{n_{A_0} - n_A}{n_{A_0}} = \frac{\Delta n_A}{n_{A_0}} \quad (34)$$

где, n_{A_0} – относительное содержание компонента А в исходной смеси.

n_A – остаточное содержание компонента А на выходе из реактора.

Степень превращения (ε) может быть рассчитана по любому компоненту исходной реагирующей смеси (обычно более дорогому).

Эффективность процесса растет по мере приближения ε к 1 ($\varepsilon \rightarrow 1$).

Выход целевого продукта (γ) – это отношение реально полученного продукта к максимально возможному количеству продукта (в соответствии с заданной реакцией).

$$\gamma_R = \frac{n_R}{n_{R_{\max}}} \quad (35)$$

Селективность (φ) – это отношение количества исходного реагента пошедшего на целевую реакцию к общему количеству израсходованного исходного реагента.

$$\varphi = \frac{\Delta n_{\text{Целев}}}{\Delta n_{A\Sigma}} \quad (36)$$

Параметр селективности (φ) актуален при возможности протекания нескольких параллельных реакций, в которых участвует исходный реагент.

Это типично для органических синтезов и ступенчатых (через образование полупродуктов) многовариантных реакций.

Технологическое совершенство процесса (коэффициенты ϵ , γ , ϕ), а также энергетическое (η_e , η_t) для каждого конкретного процесса и каждой ХТС имеют свою иерархию значимости, т. е. реально невозможно иметь все значения КЭ на максимальном уровне. Поэтому указанные коэффициенты ранжируются по степени важности. Оптимальными являются такие коэффициенты и в таком сочетании значений, которые позволяют обеспечить максимальную экономичность процесса и качество выпускаемого продукта.

Производительность (П) – это количество целевого продукта получаемого за единицу времени. Иногда - это количество перерабатываемого сырья.

$$П = n_R m / \Delta\tau, \quad [\text{кг/час}], [\text{т/сут}] \quad (37)$$

Если известна концентрация целевого продукта (C_R) и массовый расход материала на выходе их ХТС, то производительность можно записать проще:

$$П = C_R G \quad (37a)$$

Максимальная проектная производительность называется мощностью производства.

Интенсивность (И) – это производительность аппарата, отнесенная к его характерному размеру: объему, площади поперечного сечения, площади теплообмена, и т. д.

$$И = П / F \quad (38)$$

$$И = П / V \quad (38a)$$

Интенсивность процесса в аппарате характеризует степень его технологического совершенства, габариты и металлоемкость конструкции. Например, интенсивность процесса теплообмена возрастает при переходе от конструкции типа «труба в трубе» к кожухо -трубчатому аппарату или к пластинчатому теплообменнику.

Достижение высоких КЭ в ХТС, (или для отдельных аппаратов) может быть осуществлено путем применения достаточно универсальных принципов:

- а) принцип наилучшего использования движущей силы ХТП.
- б) принцип наиболее полного использования сырья, или переработки реагентов.

в) принцип рационального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

г) принцип наилучшего функционально – структурного использования аппаратов и машин при пространственной компоновке оборудования.

д) принцип замкнутого водоснабжения и т.п. .

А) Принцип наилучшего использования движущей силы ХТС.

Этот принцип наиболее пригоден для использования на стадии проектирования ресурсосберегающей ХТС. Его суть заключается в использовании высоких химических и энергетических потенциалов исходного сырья и в рациональном комбинировании экзо - и эндотермических процессов. Он реализуется через порядок чередования, сопряженных в единой ХТС, технологических и энергетических процессов по мере убывания потенциала рабочих сред.

Б) Принцип наиболее полной переработки сырья.

Он реализуется через:

- а) комплексное использование сырья.
- б) увеличение полноты переработки сырья.
- в) через минимизацию отходов производства.

В дальнейшем отходы производства и полупродукты мы будем называть вторичными материальными ресурсами (ВМР).

Приемы, через которые реализуется данный принцип.

- а) обогащение исходных компонентов сырья.,
- б) выбор рациональной технологической схемы процесса.,
- в) применение избытка дешевых реагентов.,
- г) противоточный контакт фаз.,
- д) регенерация реагентов.,
- е) введение рециклов.

Принцип рецикла – есть прием повышения степени используемого сырья не в отдельном аппарате, а в ХТС в целом, при этом появляется управляющая возможность поддерживать:

- оптимальные условия проведения процесса (температура, давление, концентрация),
- свести к минимуму образование побочных продуктов реакции (особенно в органических производствах),
- «консервировать» теплоту, приобретенную потоком реагентов в процессе предшествующих стадий,

- накапливать в рециркулирующем газе трудноконцентрируемые инертные примеси (например, аргон, гелий и т.д.).

Данный принцип технологически оформляется в виде безотходных ХТП и малоотходных ХТС. Стопроцентная безотходность ХТП и ХТС – это техническая идеализация. В технике в лучшем случае реализуются малоотходные ХТС, которые характеризуются:

- максимальной степенью переработки сырья;
- минимизацией выбросов стоков и отходов;
- использованием полупродуктов основного ХТП для проведения параллельных ХТП.

В) Принцип рационального использования ТЭР.

Этот принцип реализуется в ХТС через следующие приемы:

- а) совмещение химических и тепло-массообменных процессов в одном аппарате;
- б) интенсификация процессов тепломассообмена через внешнее маломощное воздействие на погрешность и уменьшение сопротивлений тепломассо-переносу для целевых процессов;
- в) создание рациональных технологических связей между элементами ХТС с учетом снижения термического потенциала потоков;
- г) утилизацию высокопотенциального и низкопотенциального тепла внутри ХТС;
- д) организацию «экспорта» вторичных энергоресурсов в приемлемом виде потребителям вне рассматриваемой ХТС.

В качестве примера совмещения химических и теплообменных процессов можно предложить реактор синтеза аммиака.

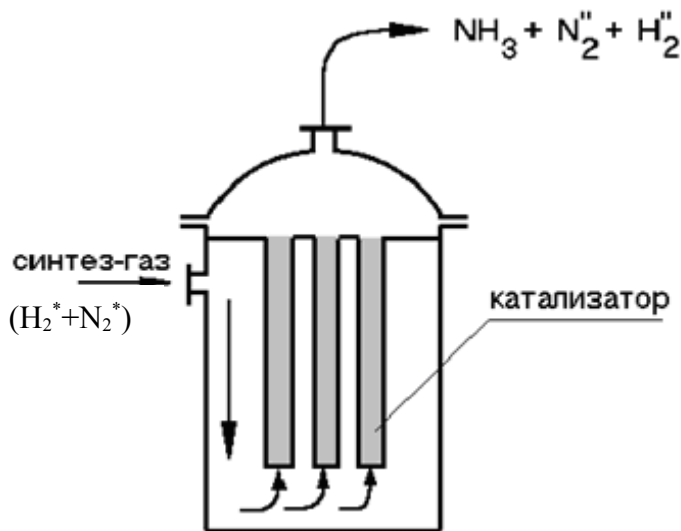
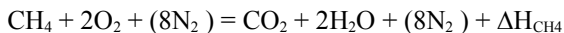


Рис. 13

Принцип работы состоит в подаче исходного сырья в межтрубное пространство реактора, где синтез-газ нагревается за счет экзотермической реакции синтеза аммиака, а затем поступает в трубное пространство, где на катализаторе происходит синтез продукта. Этот аппарат является реактором с внутренним утилизационным теплообменом.

Экономия органических топлив при производстве тепловой энергии в аспекте 100% использования топлива обычно решается путем введения избытка окислителя. Рассмотрим эту проблему на примере сжигания природного газа:



Как правило, при стехиометрическом соотношении газ - окислитель степень использования природного газа колеблется в пределах 98%. Поэтому в технологических инструкциях рекомендуется применять избыток окислителя $\approx 10\%$. (коэффициент избытка $\alpha=1,1$).

Из уравнения видно, что на 10 объем (V) CH_4 при $\alpha = 1$ приходится 10V воздуха, а при коэффициенте $\alpha = 1,1$ - 11V воздуха.

При горении в условиях стехиометрии температура дымовых газов (расчетная) $\approx 2000^\circ\text{C}$. При введении избытка окислителя расчетная температура снизится. Для определения целесообразности введения избытка окислителя оценим потери энергии от недожога природного газа. (2% от теплового эффекта сжигания CH_4), что составит 1115 кДж/кг (CH_4)

Оценим количество дополнительной энергии, которая потратится для прогрева избытка воздуха от 0 до 2000°С.

$$\Delta Q = V \cdot \rho_v \cdot C_p (2000-0) = 1 \cdot 1,21 \cdot 1,02 \cdot 2000 = 2692 \text{ кДж/кг(сн}_4\text{)}$$

Эти дополнительные затраты энергии более чем вдвое перекрывают эффект от полного сгорания 2% газа (1115 кДж). При 5% недожигании метана недополученная энергия (2787 кДж) уже перекрывает затраты на прогрев избытка ($\alpha=1,1$) воздуха, введение избытка окислителя ($\alpha = 1,1\%$) эффективно при степени первоначального сжигания газа менее 95% при отсутствии требований к сохранению расчетного уровня температур. Таким образом избыток окислителя не является абсолютно энергосберегающим приемом.

Принцип создания технологических связей, объединяющих тепловыделяющие и теплопотребляющие элементы ХТС, рассмотрим по схеме, разработанной Б.Л.Линхофом. Три потока нагреваются от 350К до 450К водяным паром при температуре 530 К. В той же ХТС три потока материалов охлаждаются водой (300 – 310 К) с $T = 600\text{К}$ до 500К.

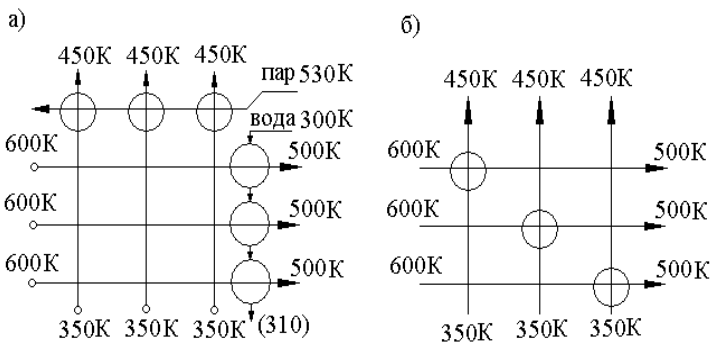


Рис. 14

Суть метода Линхофен в регенерации тепла от высокотемпературных потоков к низкотемпературным без использования промежуточных теплоносителей (в данном случае пар и вода). При этом переход от схемы а) к схеме б), уменьшает расчетную площадь теплообмена с 3,67 ед. площади до 2,0 единиц.

Эта схема отражает Второй закон термодинамики и должна корректироваться по Первому закону через энергетические балансы.

При компоновке теплообменного оборудования, рекуперацию тепла соизмеримых по мощности технологических потоков следует проводить между «соседними» потоками по температурной шкале.

Применение этого принципа необходимо соизмерять с удельными капзатратами на создание больших поверхностей теплообмена при малых градиентах температур между энергоносителями.

Г) Принцип наилучшего функционально – структурного использования аппаратов и машин.

Прием рациональной компоновки в ХТП и процессов тепло и массообмена универсально реализуются в так называемых «крупных» агрегатах. В них же наиболее полно реализуется принцип рационально пространственной компоновки. В этом случае эффект достигается не только за счет комбинации технологических и энергетических процессов, но и через экономию капитальных затрат на создание больших агрегатов, а так же вспомогательных зданий и сооружений. Кроме того, при обслуживании больших агрегатов наблюдается существенная экономия рабочей силы и энергозатрат на отопление и поддержание рабочих режимов.

Наиболее значительные крупнотоннажные производства имеют следующую мощность:

- по аммиаку – 450 000 тонн в год;
- по фосфорной кислоте – до 300 000 тонн в год;
- по аммиачной селитре – до 450 000 тонн в год;
- по серной кислоте – 500 000 тонн в год.

Не вдаваясь в механику получения эффекта, можно записать следующие соотношения показателей производства при переходе от традиционных ХТС к большим агрегатам. Допустим, мы имели следующие показатели исходного производства:

- 1) мощность (M_1 , т/час);
- 2) удельные капзатраты (K_1 , руб/т);
- 3) себестоимость (S_1 , руб/т);
- 4) внешние теплотери (Q_1 , кДж).

При переходе к большим агрегатам соответствующие показатели будут иметь следующие значения (индекс – 2).

1. Энергозатраты на компенсацию внешних потерь:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

2. При удвоении мощности $M_2 = 2M_1$, удельные капзатраты снижаются на 15 – 20 % : $K_2 = (0,8 - 0,85) K_1$;

3. Суммарные капзатраты ($K \cdot M$) растут в меньшей пропорции, чем растет мощность:

$$(K_2 \cdot M_2) / (K_1 \cdot M_1) = (M_2 / M_1)^z, \text{ где } z = 0,6 - 0,9$$

4. Себестоимость продукции с ростом производительности падает особенно резко:

$$S_2 / S_1 = (M_1 / M_2)^n \text{ где, } n = 0,2 - 0,3$$

5. Удельный расход сырья практически не зависит от мощности.

Рост единичной мощности крупных агрегатов ограничивается по техническим соображениям, в связи:

- 1) с усложнением конструкции единичных узлов;
- 2) с чрезмерным увеличением габаритов единичных узлов (сложность перевозки);
- 3) с большим единичным весом неразборных узлов (сложность монтажа).

Принципиальным препятствием для дальнейшего укрупнения больших агрегатов можно считать:

1. недоступные в настоящее время требования к уровню надежности их работы;
2. экологическая опасность от незапланированных разовых выбросов технологических сред в атмосферу;
3. существенные экономические потери при незапланированных остановках.

К основным причинам, обеспечивающим большую экономическую эффективность крупных агрегатов, следует отнести существенную экономию энерго - материальных ресурсов за счет комбинирования тепловыделяющих и теплопотребляющих элементов ХТС. Оптимальная пространственная компоновка крупных агрегатов существенно облегчает утилизацию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) внутри больших агрегатов, утилизацию механической работы и потенциальной энергии внутри больших агрегатов, а также организацию экспорта энергоресурсов на ХТС.

В отличие от утилизации энергии внутри ХТС, когда снижается потребность в свежей энергии, экспорт энергии в виде тепла или электричества дает экономический эффект, но не снижает удельное энергопотребление в данной ХТС.

Основы энерготехнологии.

Энерготехнология – комплексная система использования топлив и материалов путем комбинирования энергетических (производства работы и энергии) и технологических (производство материалов) процессов внутри энерготехнологической ХТС или агрегата.

Цель разработки энерготехнологических схем – использование энергетических и материальных составляющих сырья и топлив с максимальным КПД.

Особый эффект принципа энерготехнологии дают:

а) в крупнотоннажных производствах (NH_3 , карбамид, минеральные кислоты, нефтепродукты и т.п.);

б) в энергоемких процессах (нефтехимия, цветная и черная металлургия);

в) у энергопроизводителей (комбинированная выработка электрической и тепловой энергии на базе топлив).

Важнейшей стороной энерготехнологии является комбинирование теплотворящих и теплотребляющих процессов в рамках единой ХТС.

Энерготехнологические установки создаются на базе или технологических процессов (например, производство аммиака) или энергетических процессов (например, производство электроэнергии по комбинированной схеме).

Для энерготехнологии на базе органических топлив действует определяющий принцип – первичное выделение (глубокая переработка) наиболее ценных составляющих с дожиганием менее ценных или трудноизвлекаемых компонентов. В качестве примера можно представить комплексное использование попутных газов при добыче нефти. В системе нефть – попутные газы, наиболее ценны (в порядке предпочтения):

а) легкие нефти;

б) газообразные углеводороды;

в) инертные газы (азот и др).

После первичного обогащения и извлечения ценных компонентов трудноизвлекаемые или загрязненные органические субстанции целесообразно сжигать. При этом вырабатывается тепловая энергия, пригодная для использования в целевых ХТП.

Подробнее рассмотрим пример энерготехнологии на базе энергетического процесса (производства электроэнергии).

Энерготехнология на базе энергетического процесса.

При производстве электроэнергии через цикл ТЭЦ замыкающими затратами являются затраты на топливо.

При получении по тепловому циклу только электроэнергии («моносхема»), 100% теплосодержания угля тратится следующим образом (рис. 15): на производство электроэнергии – 45%, с дымовыми газами теряется около 5%, другие потери ТЭЦ \approx 2%.

Основные потери тепла (47%) образуются при работе паровой турбины в конденсационном режиме, где исходный пар с параметрами 560^oC и давлением 240 бар превращается в конденсат с температурой 40 – 50 ^oC на выходе из турбины. Тепло конденсата рассеивается в воде открытого водоема, имеющую среднегодовую температуру +10^oC.

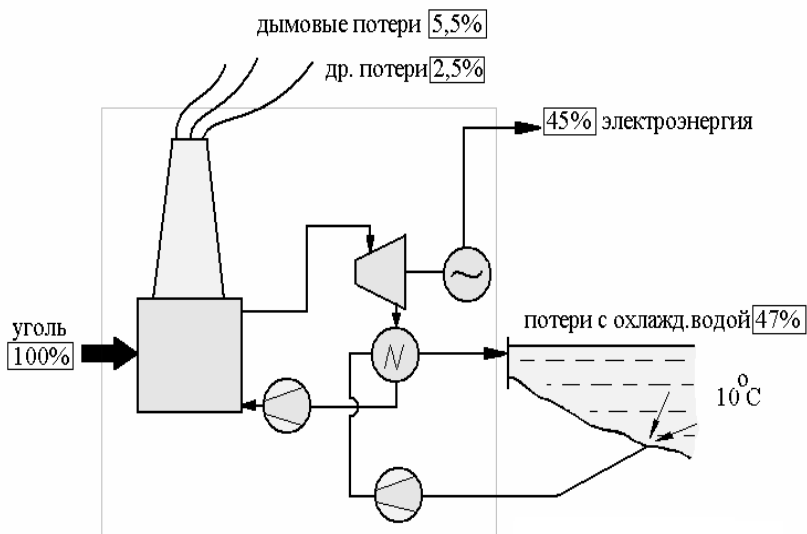


Рис.15

Общий энергетический КПД этой схемы 45% . Основной недостаток – перевод 47% эксергии топлива в анергию в теплообменнике-конденсаторе.

При переходе от моносхемы (рис. 15) к комбинированному производству электроэнергии и тепла (рис. 16) меняется режим работы только паровой турбины. Конструктивно это означает замену конденсационной турбины (температура на выходе минимальная) на турбину с противодавлением, вырабатывающую энергоноситель с температурой 90 – 110 °С.

Тепло на выходе из турбины через промежуточный теплообменник подается в центральный тепловой пункт (ЦТП) и используется для целей отопления и горячего водоснабжения. Доля вторичного тепла при этом достигает 56% от теплосодержания топлива. Это позволяет даже с учетом снижения доли эксергии, идущей на электроэнергию до 36 %, иметь общий КПД 92 %.

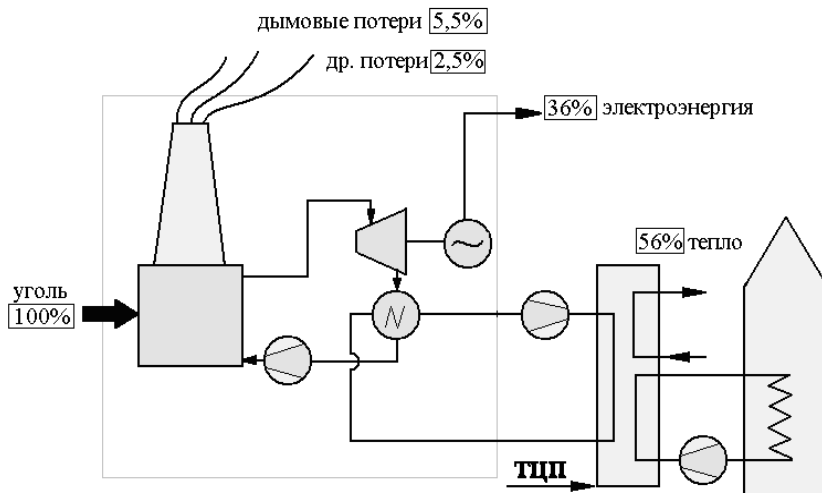


Рис. 16

Рис. 16 является примером энерготехнологической схемы, где не только получают высокий процент полезного использования энергии топлива ($\approx 92\%$), но и вырабатывают гипс (CaSO_4). Гипс получают путем выделения сернистых газов, образующихся при сжигании угля, из дымовых газов, и кальция из солей жесткости охлаждающей воды.

При этом решается и экологическая задача – охрана окружающей среды от сорнистых выбросов, и предотвращение сброса солей кальция, получаемого в процессе водоподготовки.

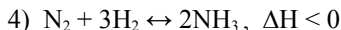
Энерготехнологическая схема на базе технологического процесса.

Рассмотрим процесс получения аммиака из природного газа на «Больших агрегатах». Получение исходной азотно-водородной смеси (ABC) реализуется, в основном, по трем типам химических реакций: лунение азотно-водородной смеси (ABC):

- 1) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$, $\Delta H > 0$
- 2) $\text{CH}_4 + 1/2 \text{O}_2 + 1/2(\text{N}_2) \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2 + 1/2(\text{N}_2)$, $\Delta H < 0$
- 3) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$, $\Delta H > 0$

Из трех реакций две (паровой конверсии CH_4 и паровой конверсии CO) для своего проведения требуют подвода тепловой энергии ($\Delta H > 0$).

Энергопровод, необходимый для проведения реакции (1) и (3), может быть реализован за счет паровоздушной конверсии метана и при сжигании метана (реакция 2). При этом в технологическом газе образуется водородный компонент, а из-за присутствия в воздухе азота (реакция 2) на выходе получается азотоводородная смесь (ABC). Из ABC по экзотермической реакции (4) синтезируется целевой продукт – аммиак.



Кроме необходимых реагентов N_2 и H_2 в ABC присутствует «лишний» компонент CO_2 , который целесообразно вывести из системы (для сокращения затрат на компремирование).

Разработке энерготехнологической схемы предшествует создание функциональной схемы (Рис. 17).

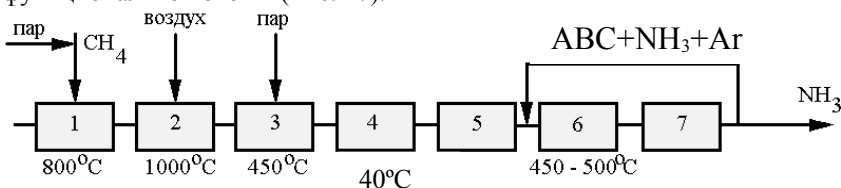


Рис. 17

Функциональная схема синтеза аммиака реализуется в 7 этапов:

- 1) Паровая конверсия метана ($\approx 800^\circ\text{C}$);
- 2) Паровоздушная конверсия метана ($t \approx 1000^\circ\text{C}$);
- 3) Паровая конверсия CO (450°C);
- 4) Очистка азотоводородной смеси от CO_2 раствором моноэтаноламина при давлении 2,6 МПа;
- 5) Сжатие ABC до 32 МПа;
- 6) Синтез аммиака (реакция 4);
- 7) Выделение аммиака из ABC (через рецикл).

Из-за низкого процента выделения целевого продукта при энергетически приемлемых условиях, вокруг блоков 6 и 7 организован рецикл.

Функциональная схема служит для построения энерготехнологической схемы процесса (Рис. 18).

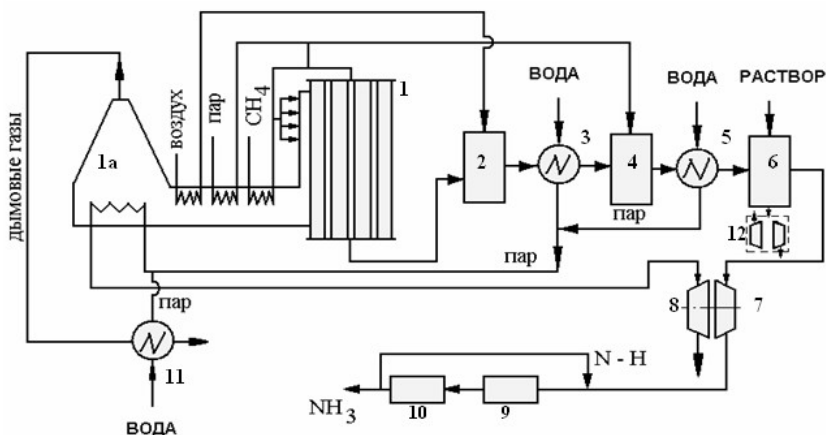


Рис. 18

Обозначения:

- 1 – трубчатый конвектор метана;
- 1а – конвекционная камера трубчатого конвектора метана;
- 2 – шахтный конвектор метана;
- 3,5,11 – котлы - утилизаторы;
- 4 – конвектор окиси углерода;
- 6 – абсорбер (водоаммиачная очистка АВС от CO_2);
- 7 – компрессор АВС;
- 8 – паровая турбина;
- 9 – колонна синтеза аммиака;
- 10 – теплообменник-холодильник;
- 12 – турбонасос.

В реакторах № 1,2,4 из метана и водяного пара по реакциям 1,2,3 (см ранее) получается водород, который в смеси с азотом воздуха (реакция №2), образует АВС. Кроме необходимых компонентов АВС в полученной смеси присутствует CO_2 , отмываемый в абсорбере (6), и инертные газы (в основном аргон), извлекаемые в области рецикла.

Таким образом, данная схема имеет комбинацию процессов по технологии (получение NH_3 и аргона) а также развитую систему энергетической утилизации двух видов энергии: тепловой и механической (энергия давления).

Утилизация механической энергии технологического потока осуществляется в блоках 7 и 8 (турбокомпрессор) и в блоке 12 (турбонасос). Рекуперация тепловой энергии базируется на трех котлах - утилизаторах (3,5,11) и в теплообменниках внутри конвективной камеры (1а).

В конвекционной камере шахтного конвектора нагреваются:

- технологический и энергетический (т.е идущий на горение в реактор 1) природный газ;
- технологический пар;
- технологический воздух.

Там же перегревается энергетический пар, поступающий в приводы из котлов-утилизаторов (3,5,11).

Пар, идущий на энергетические нужды данной энерготехнологической ХТС, так же генерируется при утилизации избыточного тепла в котлах – утилизаторах.

Целью энерготехнологической схемы производства аммиака является:

- Минимизация потребления «свежей» эксергии (электроэнергии и топлива) от внешних источников;
- Максимальная утилизация вторичных энергоресурсов (в виде тепла и работы внутри данной ХТС);
- Комплексная энергетическая и экологическая оптимизация процесса внутри ХТС.

Принципы использования вторичных энергоматериальных ресурсов.

Энергосырьевая база химической промышленности.

На получение 1 тонны продукта в химической промышленности требуется от 3-4 до 5-6 тонн сырьевых ресурсов: исходного сырья, воды, воздуха, топлив.

Важнейшей задачей в этой связи является:

- а) минимизация расходных коэффициентов на выпуск целевой продукции;
- б) комплексная переработка исходного сырья;
- в) максимальное использование вторичных энергоматериальных ресурсов.

Сырьевые затраты можно классифицировать по ряду признаков:

- 1) по происхождению материала:
 - минеральное;
 - растительное;
 - животное.
- 2) по характеру запасов:
 - не возобновляемые (руды, минералы, нефть, газ, уголь);
 - возобновляемые (вода, воздух, растительное и животное сырье,

- древесина);
- 3) по химическому составу:
 - неорганическое;
 - органическое.
 - 4) по агрегатному состоянию:
 - твердое;
 - жидкое;
 - газообразное.
 - 5) по степени передела:
 - природное и искусственное;
 - первичное и вторичное.

К первичному сырью предъявляют следующие требования:

- 1) максимальная концентрация ценных компонентов;
- 2) минимальные требования к параметрам процесса переработки (температура, давление);
- 3) максимальное содержание удельной эксергии;
- 4) минимальные затраты на предварительную подготовку и стандартизацию сырья.

Эти же требования (с понижающим коэффициентом по качеству) предъявляются и к вторичным материальным (ВМР) и эксергетическим (ВЭР) ресурсам.

Целесообразна следующая классификация вторичных материальных ресурсов (ВМР):

по агрегатному состоянию (твердые отходы, жидкие стоки, газовые выбросы), и по стадии появления (из сырья, из промежуточных полупродуктов, из некондиционных целевых продуктов). Кроме того, при оценке качества ВМР необходимо выделить следующие свойства:

- 1) стабильность состава;
- 2) сохраняемость (реагирует с окружающей средой или нет);
- 3) пирофобность (воспламеняемость);
- 4) транспортные свойства (крупнотоннажность);
- 5) систематичность выделения (постоянная, периодическая, разовая в несколько лет или месяцев).

При использовании вторичных материальных ресурсов обязательен учет классов опасности вторичных материалов. Степень опасности снижается с номером группы, причем материалы 1, 2 и 3 групп перед захоронением должны быть переработаны или нейтрализованы. Захоронению не подлежат горючие материалы и тяжелые металлы максимальной валентности (например, Cr^{+6}).

Классы опасности:

1 класс – оксидосодержащие материалы (гальваношламы, катализаторы типа ГИАП – 16, НТК – 4 и т.п.);

2 класс – кубовые остатки, смолы, активные шлаки, катализаторы типа ГИАП – 10, СТК – 1, и т.п..

3 класс – сажа, некондиционные удобрения, шламы, полимеры, и т.д.

4 класс – гипс, бетон, стекло и др. инертные материалы.

Качество вторичных материальных ресурсов как сырьевой базы для параллельных производств напрямую связано со степенью их загрязненности другими отходами и определяется методом сбора и хранения ВМР одним из двух вариантов:

- а) сбор смесевых отходов;
- б) отдельный сбор бытовых и промышленных отходов.

Отдельный сбор промышленных отходов давно практикуется в промышленности, а бытовых в центральной Европе:

Например, в ФРГ отдельно собираются:

- 1) бумага полиграфическая;
- 2) фольга и полимерная упаковка;
- 3) пищевые отходы.

Кроме того, на площадках сбора рядом установлены три емкости с раскатателями для сбора боя бутылочного стекла (по цветам). Крупные бытовые отходы (рамы, мебель, обувь, телевизоры и т.д.) складывают в открытые. Вывоз разобранных отходов для жильцов стоит в 5 раз меньше чем смешанных.

Количество мусора, приходящееся на одного человека на конец XX века составило:

- в США – 715 кг / год;
- в Швеции – 480 кг / год;
- в Германии – 450 кг / год;
- в Москве* – 270 кг / год.

Большая часть отходов в мире и практически стопроцентно в России является смешанными. Смешанные отходы «перерабатывают» двумя путями:

- а) через депонирование (захоронение);
- б) через сжигание: на мусоросжигающих заводах или на открытых полигонах (неконтролируемое сжигание).

Депонирование должно происходить на специальных участках, имеющих гидроизоляцию, систему отвода и нейтрализации стоков. Захоронения производят послойно с промежуточной засыпкой слоями почвы на основе глины. Для уменьшения объема, перед захоронением мусор может брикетироваться путем прессования. Указанная технология не предотвращает загрязнения почвы, воды и воздуха, но (относительно мусоросжигающих заводов), требует меньше капитальных и текущих затрат. Технология мусоросжигания развита в странах как со смешанным мусоросбором, так и в странах с отдельным сбором мусора в упрощенном варианте.

* На 2008-09 гг – 330 – 350 кг/год

**Энерготехнологическая схема мусоросжигающего завода
для смесевых отходов.**

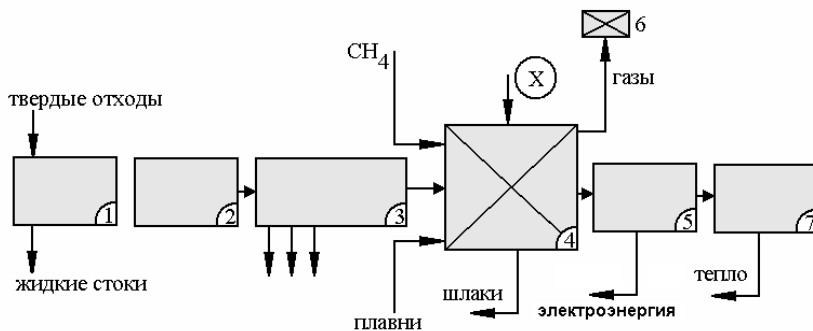


Рис. 19 Схема мусоросжигательного завода

Мусоросжигательный завод, как энерготехнологическая ХТС, содержит следующие блоки:

- 1 – отделение прессования с удалением жидких составляющих (вода, нефтепродукты, биологические жидкости). Отделение включает в себя аппаратуру для нейтрализации стоков.
- 2 – блок измельчения и гомогенизации твердых отходов;
- 3 – блок сепарации, где из твердых отходов извлекают:
 - а) магнитные металлы (черная сталь);
 - б) немагнитные металлы;
 - в) стеклобой (по цвету);
 - г) твердую пластмассу и строительные материалы (частично).

Задачей этого отделения является выделение из твердых отходов наиболее ценных компонентов и негорючих составляющих.

- 4 – топка для сжигания мусора – «сердце» и самый ответственный агрегат мусоросжигающего завода, где нестандартный энергоресурс (мусор) превращается в стандартный энергоноситель – водяной пар.

Сложность организации процесса в топке связана с низкой теплотворной способностью и нестабильностью состава горючих компонентов сжигаемого мусора (дерево, органические вещества, пластмассы, бумага, биологические компоненты). Для поддержания горения в топку вводятся вещества «X», выделяющие кислород в процессе разложения (например аммонийные соли),

и стандартное топливо (природный газ). Для выведения зольных остатков и шлаков режиме в топку вводятся *плавни* – вещества, понижающие температуру плавления и улучшающие текучесть шлаков. Выводимые шлаки используют как компоненты дешевых стройматериалов или направляют на захоронение.

Выделяемые в процессе горения мусора газовые выбросы – самые опасные составляющие процесса мусоросжигания. Поддержание экологически безопасного состояния газа на выходе из топки требует четкого соблюдения технологии процесса сжигания и наличие специальных очистных устройств (**блок б**).

Поддержание технологии сжигания подразумевает стабилизацию двух параметров:

а) температуры горения, обеспечивающей максимально полное сжигание мусора;

б) заданный темп охлаждения дымовых газов, обеспечивающий протекание необходимых равновесных реакций в газовой смеси, в частности, разложение окислов азота при медленном охлаждении. Для регулирования температуры и скорости охлаждения дымовых газов, кроме наружной теплоизоляции, целесообразно использовать безинерционный подвод тепла от электрических источников (электродуговой или плазменный нагрев). При наличии в отходах отравляющих веществ (ОВ), при образовании ОВ в процессе горения (например, полимеров), при наличии в отходах токсичных биологических остатков (например, из медучреждений) необходимо повышать температуру горения. Более лучший способ – отдельное сжигание биологических и медицинских отходов в плазменных печах.

Блоки 5 и 7 расположены на «чистой» стороне мусоросжигающего завода. Они аналогичны соответствующим агрегатам ТЭЦ.

5 – блок электрогенерации (паровая турбина – электрический генератор), где вырабатываемая электроэнергия, обеспечивает механические процессы мусоросжигательного завода и поставляет электроэнергию на «сторону» (внешнему потребителю).

7 – блок утилизации тепла, где – полученное тепло используют для отопления помещений завода, для горячего водоснабжения и экспорт тепла сторонним потребителям (50 – 70%) от выработки.

В настоящее время в мире функционирует около 3000 мусоросжигающих заводов, где из смесового мусора извлекается около 10-12% ВМР, а остальные компоненты сжигаются с получением вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Кроме заводов перерабатывающих смесовые отходы, в настоящее время появились рециклинговые производства, сложной техники (автомобильной, бытовой и электронной техники) и пластмасс.

Кроме бытовых отходов источником ВМР являются классифицированные промышленные отходы. В наибольшей степени повторному использо-

ванию подлежат твердые отходы промышленности, и в меньшей степени жидкие. Газовые выбросы, как правило, подвергаются только экологической очистке (от пылевых частиц, от вредных органических соединений), а далее просто рассеиваются в атмосфере.

Жидкие стоки с неконцентрированными ВМР, как правило, перед удалением подвергаются следующим операциям:

- а) Отстаивание;
- б) Обеззараживание;
- в) Осветление и разбавление.

Концентрированные стоки, (например, содержащие растворители, нефтепродукты, полимерные соединения,) перед вторичным использованием подвергаются операциям обогащения: выпаривание, вымораживание, выделение легколетучих фракций термическим методом и т.д..

Важнейшей операцией подготовки стоков к сливу является обеззараживание. Оно может быть проведено следующими методами:

- а) Химическое обеззараживание (через активный озон, иницируемый хлором или хлорсодержащими реагентами);
- б) облучение жидкости «жестким» излучением;
- в) электрохимическое озонирование жидкости, обладающей электролитическими свойствами.

При использовании концентрированных стоков, как правило, убирается водная составляющая, а органические компоненты используются в производстве ГСМ, противокоррозионных и ингибирующих составов растворителей. При этом расширяется сырьевая база, удешевляется целевой продукт (при некотором снижении чистоты и качества), а в некоторых случаях у полученных продуктов появляются новые свойства и области применения.

Более широко в качестве ВМР используются твердые отходы промышленного производства и компоненты из бытовых отходов, полученные при мусоросжигании. Это в первую очередь, лом черных и цветных металлов, что общеизвестно. Перед применением, твердые отходы, как правило, обеззараживают термическим или химическим способом, а затем подвергают нескольким операциям предварительного передела. Целью этих операций является:

- 1) обезвоживание ВМР;
- 2) измельчение отходов до стандартных размеров;
- 3) обогащение полученной массы по целевому компоненту. При этом

используются следующие методы обогащения, применяемые также для свежего сырья:

- гравитационное рассеивание;
- электромагнитная сепарация;
- электростатическая сепарация;

- флотация разнородных по смачиваемости материалов в газожидкостных средах.

Твердые отходы органического состава могут служить также источником ВЭР – вторичных энергоресурсов.

Утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Вторичные энергетические ресурсы можно классифицировать на три типа:

- 1) горючие или топливные ВЭР (попутные газы нефтедобычи, древесные отходы, включая мусор);
- 2) тепловые ВЭР. Они используют теплоту реакций и проявляются в виде: дымовых газов, «мятого» пара и конденсата, горячих технологических сред и т.п., Это – **избыточное тепло промышленности.**
- 1) ВЭР избыточного давления. Они используют эксергию давления газов и жидкостей и применяются в качестве турбоприводов для насосов, компрессоров и газодувок.

Наиболее универсально ВЭР используются для отопления. К примеру, в Дании из 100% энергии потребляемой для целей централизованного теплоснабжения /9/:

- Избыточное тепло промышленности дает 4%;
- Мусоросжигающие заводы – 12%;
- Биомасса и биогаз, получаемые из навоза и отходов древесины – 8 %;

Итого: около четверти теплопотребления компенсируется за счет ВЭР (в Швеции даже – до 33% тепла на отопление).

В качестве первичного топлива, в Дании используется уголь (60%), мазут (12%) и природный газ (3%). При этом, на 100% мощности используются только котельные, потребляющие ВЭР. Во вторую очередь загружены угольные котельные, а газовые агрегаты по датским законам, должны иметь возможность перейти на альтернативное топливо в течение 1 часа, после сообщения газовой компании о продаже газа другому потребителю по более выгодной цене.

Преимущественное сжигание отходов не увеличивает нагрузку на атмосферу по CO₂, что дает дополнительно экологический эффект.

Недостатками ВЭР топливного типа является их нестабильность по составу и тепловому эффекту, а также возможность образования при сжигании токсичных газов. Некоторые ВЭР требуют специального подхода к процессу сжигания. В то же время многие природные топлива имеют меньшую тепловорную способность, чем ВЭР (табл. 3).

К примеру, приведем теплотворную способность наиболее распространенных топлив:

Таблица 3

Дрова	12000 – 10200 [кДж/кг]
Торф	10330 – 8490 [кДж/кг]
Бурый уголь	11840 – 10500 [кДж/кг]
Антрацит	27610 – 27190 [кДж/кг]
Каменный уголь (Кузнецкий бассейн)	24270 – 23850 [кДж/кг]
Бензин	47280 – 43930 [кДж/кг]
Мазут	43930 – 39750 [кДж/кг]
Природный газ	39750 – 34730 [кДж/кг]
Попутный газ	20000 – 13000 [кДж/кг]

Теплотворная способность топлива пропорциональна его удельной эксергии. А удельная эксергия должна корректироваться с его ценой.

Режим ресурсоэнергосбережения в промышленном водопользовании.

Принцип замкнутого водоснабжения является универсальным примером безотходной технологии и базируется на следующих элементах:

- а) химическая водоподготовка;
- б) защита сетей от накипно – коррозионных и других отложений;
- в) рециркуляция воды с компенсирующей подпиткой.

Вода является основным тепловым энергоносителем и химическим реагентом в большей части химико-технологического производства. Принципиальная схема водопользования представлена в следующей схеме (рис. 20).

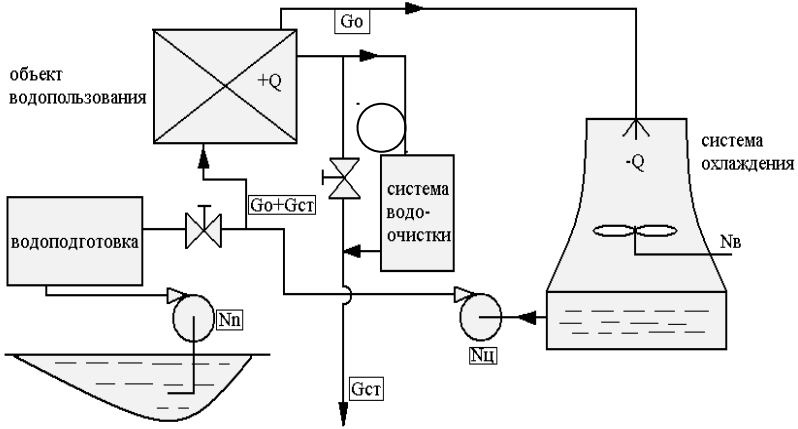


Рис. 20

В объекте водопользования, как правило, подводится тепло (+Q), рассеиваемое в системе охлаждения (-Q).

Системы водоснабжения могут быть:

- а) открытые и закрытые;
- б) замкнутые и не замкнутые.

Замкнутые системы подразумевают использование водооборотных циклов. Закрытые системы предусматривают отсутствие неконтролируемого расхода воды в цикле (например, при испарительном охлаждении).

На схеме (рис.20) изображена замкнутая открытая система водопользования с охлаждением рециркулирующей воды (G_0) в градирне за счет теплоотвода на испарение 5-10% G_0 .

Существует несколько причин, связывающих проблемы водопользования и ресурсосбережения:

Во-первых, водяные насосы в промышленности потребляют порядка 10% электроэнергии;

Во-вторых – образование накипи при недостаточной очистке воды на десятки процентов повышают расход топлива в тепловых процессах (2 – 4 мм накипи увеличивают расход газа в котле, на 15-20%).

В-третьих, нейтрализация избыточных стоков (при открытых схемах) и умягчение воды (в закрытых схемах) вызывает необходимость использования большого количества экологически опасных реагентов, поступающих в открытые водоемы через стоки.

В-четвертых, коррозионное разрушение сетевых трубопроводов приводит к выходу из строя основных фондов, т.е. - перерасходу чистой воды и дополнительному привлечению конструкционных материалов для защиты труб.

Основные принципы энергоресурсосбережения при водопользовании:

1. Соответствие глубины очистки потребностям конкретных производств. В частности для водяных котлов допустима жесткость воды 5 – 7 мг/л, для паровых котлов низкого давления и технологических нужд требуется жесткость не более 0,1-0,2 мг/л.
2. Переход на замкнутые системы водопотребления по каждой номенклатуре воды.
3. Минимизация утечек воды в магистральных водопроводах и у потребителей.
4. Минимизация коррозионных и накипно-коррозионных загрязнений промводы.
5. Максимальное использование климатических факторов в водооборотных циклах, например, отключение осенью и зимой части форсунок на градирнях.
6. Грамотное использование существующих технологий водоподготовки и новых приемов очистки промышленных и сточных вод.

Главная проблема заключается не в достижении максимальной степени очистки воды по всем видам загрязнений, а в экономичном (с учетом объема водопользования) сочетании приемов водоподготовки. Естественно, применительно к характеристикам исходной воды.

Характеристика источников промышленной воды.

На Земле находится $1,39 \cdot 10^{18}$ тонн воды, из них только 0,3% пресной воды. Самыми богатыми странами в этом плане являются Бразилия и Россия. Но у нас 23% приходится на Европейскую часть, а 77% на Сибирь. Морская вода представляет из себя солевой раствор карбонатов, сульфатов и хлоридов кальция, магния, натрия и калия, с общим солесодержанием более 100 – 1000 мг/л.

Существует три класса пресной воды используемой в промышленности:

1. Вода из артезианских скважин;
2. Атмосферная вода (осадки) – эта вода наиболее мягкая, как прошедшая естественную дистилляцию;
3. Вода из открытых водоемов с максимальным содержанием биологических загрязнений.

В городах мелкие предприятия используют сетевую воду городского водоснабжения (после хлорирования). Системы водоподготовки предприятия рассчитывают на максимально возможные загрязнения по солям жесткости,

по механическим взвесям, по коллоидным соединениям, по растворенным газам, а так же по биозагрязнению.

Состав промышленной воды регламентируют по следующим показателям:

1. Содержание взвешенных веществ (мг / л);
2. Сухой остаток (мг / л); Различия: взвешенные вещества содержат органические и минеральные соединения, а сухой остаток содержит в основном минеральные вещества после выпаривания.
3. Показатель рН (природные воды, как правило, имеют рН = 6,5 – 10);
4. Жесткость воды:
 - карбонатная или устранимая при кипячении,
 - прочая жесткость (сульфаты, хлориды, соли кремниевой кислоты) неустраиваемая при кипячении. «Неустраиваемую жесткость называют постоянной»;
5. Окисляемость воды – она отражает присутствие в воде органических соединений железа и кислорода. Например, по кислороду артезианская вода содержит 1 – 3 мг/л, озерная 5 – 8 мг/л, речная 60 мг/л и более;
6. Биозагрязнения (бактериальные загрязнения). При их наличии (и для страховки) в системы водоподготовки вводятся процессы, аналогичные тем, которые служат для обеззараживания сточных вод, т.е. хлорирование, облучение, азотирование.

Для выдерживания стандартных значений по вышеперечисленным показателям промышленная система водоподготовки обязательно включает в себя следующие элементы:

1. Блок механической очистки;
2. Аппаратура осветления воды от коллоидных частиц, с помощью коагулянтов (реагенты типа $Al_2(SO_4)_3$);
3. Обеззараживание (по известным приемам);
4. Блоки умягчения воды, т.е. удаление накипеобразующих компонентов. Эта стадия наиболее ответственная и наиболее трудоемкая во всей системе водоподготовки. Она характеризуется наличием достаточно сложной аппаратуры, большим расходом реагентов и наличием стоков. В зависимости от масштабов производства применяются различные методы умягчения:
 - а) Физические методы (дистилляция и выпаривание);
 - б) Фосфатирование воды комплексонами типа ОЭДФ;
 - в) Через ионообменные фильтры (натрий-катионовые или водород-катионовые);
 - г) Мембранная очистка.

Физические методы, при отсутствии природных источников энергии, чрезвычайно дороги и при подготовке больших количеств воды практически не используются.

Дозировка комплексонов типа ОЭДФ сравнительно новый процесс в Российской промышленности (30 – 35 лет). Суть процесса заключается в переводе ионов Ca, Mg, Fe во временно растворимое состояние, что предотвращает в течение некоторого времени их осаждение на теплонапряженные поверхности. Процесс дозировки комплексонов осуществляется специальными насосами при минимальном расходе реагентов. Цена 1м³ воды полученного этим методом минимум в 10 раз меньше, чем при использовании ионообменных смол. Этот метод целесообразно применять при требовании к жесткости воды более 3-5 мг/л (для водогрейных котлов).

Метод катионитной очистки заключается в обмене ионов жесткости (Ca, Mg), образующих накипь, на ионы натрия или водорода, поступающего из ионообменной смолы в очищаемую воду и не дающие накипи. К недостаткам ионообменной технологии относят:

- периодичность работы фильтров;
- дороговизна и нестабильное качество ионообменной смолы;
- необходимость периодической регенерации (раз в течение 5 – 10 часов отработанные смолы растворами поваренной соли для натрий-катионовых фильтров, или серной кислотой – для водород-катионовых фильтров. Причем стоки необходимо подвергнуть нейтрализации. В то же время степень удаления солей жесткости (по данному методу) максимальна.

В последние годы появились сравнительно эффективные технологии очистки солей жесткости на разделительных мембранах. Но как вспомогательная стадия.

Последняя стадия водоподготовки – это деаэрация и корректировка pH. Цель данной стадии – уменьшение коррозионной активности промышленной воды. Деаэрация осуществляется в специальных аппаратах, а корректировку pH, до оптимального уровня - около 9,5 – 9,7 осуществляют путем введения реагентов по методике, аналогичной для ОЭДФ.

В целом оптимальная водоподготовка является мощным резервом экономии энерго-материальных ресурсов, как текущих, (на кубометр очищенной воды), так и капитальных (на восстановление основных фондов).

Библиографический список

1. Ключевский В.С. Курс русской истории, часть 1, М. «Мысль» 1987-430 с.
2. Паршин А.П. Почему Россия не Америка, М «Крымский мост» и ТЦ «Форум», 1999-340 с.
3. Давиденко И., Кеслера., Ресурсы цивилизации., М., изд ЭКСМО, 2005-544 с.
4. Бэр Г.Д., Техническая термодинамика, М., «Мир» 1977-518 с.
5. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа, М., «Энергия» 1973-206 с.
6. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем М. «Химия», 1991-432 с.
7. Лейтес И.Л. и др. Теория и практика химической энерготехнологии. М., «Химия», 1988-280 с.
8. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию (Под редакцией Дытнерского Ю.И.), М. «Химия» 1991-496 с.
9. Повышение эффективности использования эксергии в промышленности ... (под редакцией Мастепакова А.М. и Когана Ю.М.), М., Министерство Топлива и энергетики РФ, 1999-242 с.

10. Белан Ф.И. Водоподготовка, М «Энергия», 1979 - 208 с.

Общие условные обозначения

1. A, a – анергия
2. C_p – теплоемкость при $P = \text{const}$
3. D_E – потери эксергии
4. E, e – эксергия
5. F – сила
6. G – расход
7. H, h – энтальпия
8. ΔH – тепловой эффект
9. I – ток
10. K, k – коэффициент
11. L – работа
12. M, m – масса
13. N – мощность
14. R – газовая постоянная
15. S, s – энтропия
16. T, t – температура (в $^{\circ}\text{C}$ или K соответственно)
17. U – напряжение
18. V – объем

19. W – скорость
20. ε – степень превращения
21. φ – селективность
22. γ – выход целевого продукта
23. μ - молекулярная масса
24. I – интенсивность процесса
25. P – производительность процесса
26. \mathcal{E} – энергия

Основные сокращения

ABC – азото-водородная смесь
 ВМР – вторичные материальные ресурсы
 ВТО – всемирно торговая организация
 ВЭР – вторичные энергоресурсы
 ГСМ – горюче-смазочные материалы
 КПД – коэффициент полезного действия
 КЭ – критерий эффективности
 ОС – окружающая среда
 ТУТ – тонна условного топлива
 ТЭР – топливно-энергетические ресурсы
 ТЕЦ – теплоэнергоцентр
 ХТП – химико-технологический процесс
 ХТС – химико-технологическая система

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть 1

Введение.....	3
Особенности географии и климата России.....	3
Климатические условия региона Новомосковска.....	4
Энерго-сырьевая база Российской Федерации.....	4
Экономические аспекты ресурсоэнергосбережения.....	6
Основы эксергетического анализа аппаратурно-технологических смен.....	8
Фактор окружающей среды (ОС).....	12
Расчет эксергетического КПД.....	13
Эксергия тепла.....	14
Потери эксергии.....	16
Расчетные формулы для потоков эксергии.....	17
Эксергия топлив.....	18
Эксергия сред, зависящих от энтропии.....	19
Методика построения эксергетических диаграмм.....	21

Итоговые сопоставления энергии и эксергии.....	29
--	----

Часть 2

Анализ химико – технологических систем (ХТС).....	30
Приемы ресурсоэнергосбережения в ХТС.....	32
Основы энерготехнологии.....	40
Энерготехнология на базе энергетического процесса.....	41
Энерготехнологическая схема на базе технологического процесса.....	43
Принципы использования вторичных энергоматериальных ресурсов.....	46
Энергосырьевая база химической промышленности.....	46
Энерготехнологическая схема мусоросжигающего завода для смесевых отходов.....	49
Утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).....	52
Режим ресурсоэнергосбережения в промышленном водопользовании.....	53
Основные принципы энергоресурсосбережения при водопользовании.....	54
Характеристика источников промышленной воды.....	55
Библиографический список.....	58
Условные обозначения и сокращения.....	59

Учебное издание

Лобанов Николай Федорович

Теоретические основы энерго-ресурсосбережения в химической промышленности

Учебное пособие

изд. 2-е переработанное и дополненное

Редактор Пряхина Н.А.

Подписано в печать Формат 60x 84^{1/16}.
Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.
Усл.печ. л. 3,2. Уч.-изд.л. 3,8
Тираж 50 экз. Заказ №

ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр

Адрес университета: 12: Москва, Миусская пл., 9.

Адрес института: 301650 Новомосковск, Тульская обл., ул. Дружбы, 8