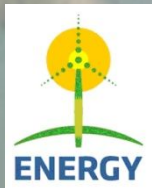




МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический  
университет



Кафедра ЮНЕСКО  
«Энергосбережение  
и возобновляемые источники энергии»



**Е.Ю. Иващенко**

**ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ  
ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Учебно-методическое пособие по дисциплине  
«Вторичные энергетические ресурсы»

Минск  
БНТУ  
2014



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический  
университет

---



Кафедра ЮНЕСКО  
«Энергосбережение  
и возобновляемые источники энергии»



Tempus

**Е.Ю. Иващенко**

## **ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Учебно-методическое пособие по дисциплине  
«Вторичные энергетические ресурсы»

для студентов специальности  
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии  
и энергетический менеджмент»

Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики и энергетического  
оборудования

Минск  
БНТУ  
2014

УДК 620.97(075.8)

ББК 31.15я7

И24

**Ивашенко, Е.Ю.**

**И24** Технологии утилизации тепловых отходов: учебно-методическое пособие по дисциплине «Вторичные энергетические ресурсы» для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / Е.Ю. Ивашенко. – Минск: БНТУ, 2014. – 108 с.

ISBN 978-985-550-678-3.

Рассмотрены технологии утилизации тепловых отходов, применяемое оборудование, экономические аспекты внедрения утилизационного оборудования.

УДК 620.97(075.8)

ББК 31.15я7

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом дисциплины «Вторичные энергетические ресурсы» для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» и является составной частью учебника «EnergySavingTechnologies»

Настоящее учебно-методическое пособие подготовлено и издано при финансовой поддержке Европейского союза. Авторы несут полную ответственность за содержание этого документа. Данная публикация отражает только точку зрения авторов и не может рассматриваться как официальная позиция Европейского союза.

Пособие разработано в рамках проекта «Разработка тренинг-сети по улучшению образования в области энергоэффективности» (ЭНЕРГИЯ), грант № 530379-TEMPUS-1-2012-1-LVTEMPUS-JPCR.

Проект одобрен Европейской комиссией в рамках программы ТЕМПУС IV – (Программный справочник EACEA/25/2011).

ISBN 978-985-550-678-3

© Ивашенко Е.Ю., 2014

© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ .....	10
2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЭР .....	12
3. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ДЛЯ ЭТОГО ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	17
3.1.    Замкнутые схемы утилизации тепловых отходов и применяемое оборудование.....	19
3.2.    Разомкнутые схемы утилизации тепловых отходов и применяемое оборудование.....	27
4 УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ .....	32
4.1. Тепловой насос.....	34
4.2 Основные типы промышленных тепловых насосов .....	36
4.3. Применение тепловых насосов в процессах сушки .....	39
4.3.1 Замкнутый цикл компрессионного теплового насоса для сушки пиломатериалов .....	39
4.3.2 Разомкнутый испарительный цикл с механической компрессией пара для концентрирования сахарного раствора .....	40
4.3.3 Термокомпрессионный тепловой насос для утилизации пара бумагосушильных установок .....	41
4.4. Рабочие вещества тепловых насосов .....	42
5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	49
5.1. Возможности использования тепловых отходов для производства электроэнергии.....	51
5.2. Применяемые технологии.....	52
5.3. Применение детандер-генераторных агрегатов для утилизации ВЭР .....	59
5.4. Области применения систем производства электроэнергии из тепловых отходов .....	61
6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ .....	63
7 АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ.....	72

8	РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ .....	75
8.1.	Сравнение вариантов схемы охлаждения вакуум-насосов и утилизации теплоты.....	79
8.2.	Расчет теоретического цикла теплового насоса .....	86
	Таблица 3 .....	89
	Параметры хладагента в характерных точках цикла .....	89
8.3.	Расчёт действительного цикла .....	91
8.4.	Определение потребляемой мощности компрессора ....	93
8.5.	Расчет действительных нагрузок на теплообменное оборудование температуры нагрева и охлаждения воды .....	94
8.6.	Расчет экономической эффективности внедрения теплоутилизационной схемы.....	97
8.7.	Обоснование инвестиций в реализуемый проект .....	103
	ЛИТЕРАТУРА.....	109
	Приложение .....	110

## ВВЕДЕНИЕ

Данный курс посвящен технологиям использования тепловых отходов и вторичных энергетических ресурсов.

Вторичные энергетические ресурсы, согласно определению, представленному в законе Республики Беларусь «Об энергосбережении» - это энергия, получаемая в ходе любого технологического процесса в результате недоиспользования первичной энергии или в виде побочного продукта основного производства и не применяемая в этом технологическом процессе.

Другими словами, вторичные энергетические ресурсы есть результат преобразования первичной энергии (рис. 1). Можно выделить три основных источника первичной энергии:

- Исчерпаемые ресурсы (ископаемые топлива): уголь, нефть, природный газ, ядерное топливо и др.
- Возобновляемые источники: энергия солнца, ветра, движущейся воды, приливов и отливов, геотермальная энергия, биомасса и т.д.
- Отходы.



Рис. 1. Первичные и вторичные источники энергии

Различают три вида вторичных энергетических ресурсов (далее ВЭР):

1. Тепловые ВЭР – тепловая энергия, образующая в результате технологического процесса или работы оборудования, которая не может быть в дальнейшем использована в данном технологическом процессе или агрегате, но может быть использована для производства тепловой энергии в виде горячей воды или пара в другом процессе или агрегате. Тепловые ВЭР могут быть использованы для целей отопления и горячего водоснабжения. К тепловым ВЭР относят и низкопотенциальное тепло, которое не может быть напрямую использовано без специальных устройств для целей теплоснабжения.

2. Горючие ВЭР – отходы одного технологического процесса, агрегата, которые могут быть использованы в качестве топлива в другом процессе, агрегате.

3. ВЭР избыточного давления – как правило, тепловые отходы с повышенным давлением, которое позволяет использовать их для производства механической или электрической энергии.

В данной работе будут более подробно рассмотрены различные виды ВЭР, их источники и некоторые технологии утилизации содержащейся в них энергии.

Промышленность, электростанции и транспорт обладают значительными запасами вторичных энергетических ресурсов. Среди них наиболее существенными производителями ВЭР являются промышленные и энергетические предприятия, нефтеперерабатывающие заводы, сталеплавильные производства, транспорт.

## **1. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Как было отмечено выше, наиважнейшими источниками тепловых ВЭР являются промышленные предприятия, электростанции и транспорт. К основным промышленным предприятиям-источникам тепловых отходов относят:

- компрессорные станции;
- нефте- и газодобывающие предприятия;
- нефте- и углеперерабатывающие предприятия;
- цементные заводы;
- химические производства;

- предприятия по производству этанола;
- целлюлозно-бумажные комбинаты;
- металлургические заводы;
- стеклоплавильные предприятия;
- мусоросжигательные заводы;
- заводы по производству кирпича и других строительных материалов;
- предприятия по производству искусственных синтетических волокон, каучука, резины, смол.

Основными носителями и агрегатами-источниками ВЭР на промышленных предприятиях являются:

- котлоагрегаты;
- технологические нагревательные устройства, печи;
- конвективные, радиационные тепловые отходы от нагретых поверхностей оборудования;
- конвективные, радиационные тепловые отходы от нагретых продуктов;
- уходящие продукты сгорания топлива до их выброса в атмосферу;
- компрессоры, газотурбинные установки, выхлопные газы поршневых двигателей;
- вода систем охлаждения технологического оборудования, воздушных компрессоров, двигателей внутреннего сгорания.

Ниже представлены некоторые примеры источников тепловых ВЭР и возможности их использования:

1. Теплота уходящих газов. Возможность и целесообразность ее использования зависит от температуры газов и растет с ее увеличением.

2. Теплота, содержащаяся в отработанном паре: возможность использования зависит от параметров пара, кроме этого возможно использование скрытой теплоты парообразования при его конденсации.

3. Конвективные и радиационные теплотери через наружные поверхности технологического оборудования: как правило, это низкопотенциальное тепло, которое может быть использовано для целей отопления и горячего водоснабжения.



4. Тепловая энергия, отбираемая при охлаждении воды: может быть полезно использована при установке теплообменных аппаратов для подогрева свежей воды на различные нужды.

5. Теплота нагретой производственной воды: может быть использована для производства холода при достаточно высокой температуре (средне- и высокопотенциальное тепло), или для производства тепловой энергии с помощью тепловых насосов, если теплота нагретой воды является низкопотенциальной.

6. Теплота продуктов, покидающих технологическую установку: возможность использования зависит от температуры и допустимости охлаждения, исходя из требований технологического процесса.

7. Теплота жидких и газообразных стоков, покидающих установку (в том числе и топливных): возможность использования достаточно низкая, если стоки сильно загрязнены и требуют выполнения поверхностей теплообменных аппаратов из особых сплавов.

Кроме этого, тепловая энергия является побочным эффектом работы различного оборудования систем энергоснабжения и энергопотребления зданий и сооружений (таких как электрические подстанции, системы кондиционирования). Это тепло чаще всего выбрасывается в окружающую среду, в то время как оно могло бы быть собрано, накоплено и использовано для систем отопления и вентиляции жилых и административных зданий. Технико-экономический анализ показывает, что проекты по использованию побочных продуктов работы основных систем в коммунально-бытовом секторе для нужд отопления являются привлекательными с точки зрения привлечения инвестиций для их реализации. Кроме того, использование такого тепла позволяет снизить выбросы вредных веществ, таких как  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ .

## **2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЭР**

*Выход ВЭР* – количество ВЭР ( $Q_{\text{вых}}$ ), образующихся в процессе производства в данном технологическом процессе за единицу времени.

*Выработка за счет ВЭР* – количество тепла, холода, электроэнергии или механической работы, получаемой за счет ВЭР в утилизационной установке ( $Q_{\text{ут}}$ ). Различают возможную, экономически целесообразную, планируемую и фактическую выработку. Возможная выработка – это максимальное количество тепла, холода, электроэнергии или механической работы, которое можно практически получить за счет данного вида ВЭР с учетом режимов работы агрегата – источника ВЭР и утилизационной установки. Экономически целесообразная выработка – это количества тепла, холода, электроэнергии или механической работы, целесообразность получения которого от утилизационной установки подтверждается экономическими расчетами. Планируемая выработка – количество тепла, холода, которое предполагается получить за счет ВЭР. Фактическая выработка – фактически полученное количество тепла, холода на действующих утилизационных установках за отчетный период.

*Коэффициент выработки за счет ВЭР* – отношение фактической (планируемой) выработки к экономически целесообразной.

*Использование ВЭР* – количество используемой у потребителей энергии ( $Q_{\text{и}}$ ), вырабатываемой за счет ВЭР в утилизационных установках, а также топлива и тепла, получаемых непосредственно в качестве вторичных энергоресурсов. Использование ВЭР также, как и выработка за счет ВЭР, может быть возможное, экономически целесообразное, планируемое и фактическое.

*Коэффициент использования выработанной энергии за счет ВЭР.*

$$\eta_{\text{ВЭР}} = \frac{Q_{\text{и}}}{Q_{\text{ут}}} \leq 1$$

Количество использованных тепловых ВЭР  $Q_{\text{и}}$  всегда меньше выработки их в утилизационной установке  $Q_{\text{ут}}$ .

Возможная выработка тепла  $Q_{\text{т}}$  в утилизационной установке за счет тепловых ВЭР [1]

$$Q_{\text{т}} = (G_1 h_1 - G_2 h_2) \beta (1 - \xi) \cdot 10^{-6}, \text{ ГДж/год.}$$

Где  $G_1$  и  $G_2$  — масса энергоносителя соответственно на входе в утилизационную установку и на выходе из нее (в общем случае  $G_1 \neq G_2$  вследствие утечек или подсоса воздуха по газовому тракту);  $h_1$  - энтальпия энергоносителя на выходе из технологического агрегата - источника ВЭР;  $h_2$  - энтальпия энергоносителя при температуре  $t_2$  на выходе из утилизационной установки, кДж/м<sup>3</sup>, кДж/кг;  $\beta$  - коэффициент, учитывающий несоответствие режима и числа часов работы утилизационной установки и агрегата-источника ВЭР;  $\xi$  - коэффициент, учитывающий теплоотвод в окружающую среду.

Возможную выработку теплоты можно найти по формуле

$$Q_{\text{ут}} = Q_{\text{вых}} \cdot \eta_{\text{ут}},$$

где  $\eta_{\text{ут}}$  - условный КПД утилизационной установки.

Возможная выработка холода  $Q_x$  за счет тепловых ВЭР рассчитывается по формуле

$$Q_x = Q_{\text{ут}} \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - холодильный коэффициент машины.

Возможная выработка электроэнергии в теплофикационных турбинах при получении в утилизационной установке пара высоких параметров может быть определена

$$W = \frac{\mathcal{E} \cdot Q_{\text{ут}}}{(1 + \mathcal{E} \cdot q_{\text{т}})},$$

где  $\mathcal{E}$  - удельная выработка электроэнергии на единицу отпущенной теплоты, кВт·ч/ГДж;  $q_{\text{т}}$  - удельный расход теплоты на производство электроэнергии при тепловом потреблении, ГДж/кВт·ч).

Отпуск теплоты  $Q_{\text{т}}$  в этом случае, т.е. при комбинированном использовании ВЭР составит

$$Q_m = \frac{Q_{yt}}{(1 + \varepsilon \cdot q_t)}$$

При поступлении пара высоких параметров из теплоутилизационных установок на конденсационную турбину выработка электроэнергии  $W$  рассчитывается по соотношению

$$W = \frac{Q_{yt}}{q_k},$$

где  $q_k$  - удельный расход теплоты на производство электроэнергии в конденсационной турбине, ГДж/кВт·ч.

*Годовая экономия теплоты* – количество тепловой энергии, которое может быть сэкономлено при производстве теплоты из вторичных энергетических ресурсов (ГДж/год).

*Экономия топлива* – количество первичного твердого, жидкого или газообразного топлива, которое может быть сэкономлено при использовании теплоты вторичных энергетических ресурсов.

При тепловом использовании ВЭР экономия топлива определяется его расходом в основных или замещаемых установках на выработку такого же количества и тех же параметров теплоты, которые получены за счет ВЭР. В этом случае экономия первичного топлива  $B_{\text{эк}}$  (т/год) составит [9]

$$B_{\text{эк}}^T = \frac{0,0341 \cdot Q_{\text{и}}}{\eta_{\text{зам}}},$$

где  $\eta_{\text{зам}}$  — коэффициент полезного действия энергетической установки, с показателями которой сопоставляется эффективность использования ВЭР (коэффициент 0,0341 указывает, что 1 ГДж эквивалентен в тепловом отношении 0,0341 т условного топлива).

При выработке холода

$$B_{\text{эк}}^x = \frac{0,0341 \cdot Q_{\text{и}}}{\eta_{\text{зам}} \cdot \varepsilon}$$

Экономия топлива при использовании ВЭР избыточного давления определяется его затратами на производство в основных энергетических установках количества электроэнергии, равного выработке ее в утилизационных установках, т.е.

$$B_{\text{ЭК}}^{\text{э}} = b_3 \cdot W,$$

где  $b_3$ - удельный расход топлива на выработку электроэнергии в энергосистеме или на замещаемой установке, с показателями которой сравнивается эффективность утилизации ВЭР, г/кВт·ч;  $W$ - выработка электрической или механической энергии за счет ВЭР на утилизационных установках, млн.кВт·ч/год.

При комбинированном энергоснабжении предприятия (тепловая энергия поступает от заводской или районной ТЭЦ) использование тепловых ВЭР для теплоснабжения может привести к временному (до момента, когда высвобождающиеся излишки будут направлены на покрытие тепловых нагрузок новых потребителей) снижению экономических показателей теплоэлектроцентрали. Экономия топлива за счет ВЭР (с учетом перерасхода его на ТЭЦ) определится по формуле

$$B_{\text{ЭК}}^{\text{к}} = \frac{0,0341 \cdot Q_{\text{и}}}{\eta_{\text{ТЭЦ}}} \cdot [1 - \varepsilon \cdot (q_{\text{к}} - q_{\text{т}})]$$

При использовании ВЭР в качестве топлива экономия топлива определяется по формуле

$$B_{\text{ЭК}} = 0,0341 \cdot Q_{\text{и}} \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} = B_{\text{и}} \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2}$$

Где  $Q_{\text{и}}$  – величина использования горючих ВЭР, ГДж/год;  $B_{\text{и}}$  – то же в условном топливе, т у т./год;  $\eta_1$  – коэффициент использования тепла топлива топливоиспользующего агрегата при работе на горючих ВЭР;  $\eta_2$  – коэффициент использования тепла топлива того же агрегата при работе на первичном топливе.

*Срок окупаемости* – период времени, требуемый для возврата первоначальных инвестиций в проект.

### **3. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ДЛЯ ЭТОГО ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Около одной трети всей используемой в республике энергии приходится на промышленность, которая располагает значительным количеством тепловых ВЭР. Основные направления повышения энергоэффективности на промышленных предприятиях ориентированы на снижение энергопотребления технологического оборудования (котлоагрегатов, печей, сушильных установок, сепараторов, двигателей и насосов) и совершенствования технологий производства. Одним из способов повышения эффективности энергопотребляющего оборудования является сбор и повторное использование тепловых отходов. В некоторых случаях, утилизация тепловых отходов промышленных печей позволяет повысить их эффективность на 10% - 50%.

Накопленное и повторно использованное тепло позволяет замещать дорогостоящее топливо или электрическую энергию, не создавая при этом дополнительных выбросов вредных веществ в атмосферу. Существует ряд технологий, позволяющих эффективно преобразовывать тепловые отходы в продукт конечного использования. Тем не менее, значительное количество тепловых ВЭР все еще остается не использованным.

Для эффективной утилизации тепловых ВЭР требуется наличие следующих компонентов: 1) доступного источника тепловых ВЭР; 2) технологии их использования; 3) конечного потребителя продуктов утилизации. Основными характеристиками источников тепловых отходов являются их количество и качество, доступность технологий утилизации, проблемы при организации системы рекуперации тепла. Результаты анализа этих факторов используются для определения выработки за счет ВЭР, которая позволяет повысить энергоэффективность промышленного предприятия.

Каждый источник ВЭР рассматривается с точки зрения содержащегося в нем количества теплоты, качественных показателей (сбросная температура), существующих и доступных технологий, проблемы организации систем рекуперации тепла. Количество теплоты, содержащее в тепловых отходах, зависит от расхода теплоносителя, его состава, температуры и определяется на основе режима энергопотребления, требуемых температур и массового баланса [8].

Максимальное количество энергии, которое может быть получено при использовании тепловых ВЭР для привода теплового двигателя определяется величиной, называемой потенциальная работа (эксергия). Определение этой характеристики позволяет оценить эффективность применения различных источников ВЭР с различными температурами.

Анализ существующих технологий показывает, что тепловые отходы, как правило, получаются от чистых, высокотемпературных источников ВЭР в крупных системах. Совершенствование технологий возможно в области оптимизации существующих систем, разработке технологий для химически агрессивных систем, утилизации низкотемпературного отработанного тепла.

Внедрение систем утилизации тепловых отходов часто ограничивается такими факторами, как температурный уровень отходов и стоимость утилизационного оборудования. Имеют место случаи, когда утилизационное оборудование установлено, однако, весь потенциал тепловых отходов использовать не удастся. Одной из причин может являться ограниченность возможности применения некоторых конструкционных материалов теплообменных аппаратов.

Анализ источников тепловых отходов, приведенный выше, показывает, что около 60% сбросного тепла является низкотемпературным (232<sup>0</sup>С и ниже). Утилизация такого тепла является менее эффективной с технической и экономической точки зрения, но именно этот вид тепловых отходов имеется на предприятиях в больших количествах, что наталкивает на мысль о том, утилизацией низкопотенциальных отходов пренебрегать не стоит. Современные технологии предоставляют различные возможности его рекуперации и применения в целях отопления и горячего водоснабжения, технологических целях.

На ряде предприятий использование тепловых ВЭР может быть ограничено содержанием в них химически активных элементов.

Использование тепловых отходов возможно по трем направлениям [2]:

*Замкнутые схемы* – тепло используется для процессов, протекающих в основных технологических установках (подогрев компонентов горения, предварительный подогрев материала). Следует отметить, что согласно определению ВЭР, тепловые отходы, используемые по таким схемам, не относятся к вторичным энергетическим ресурсам.

*Разомкнутые схемы* установок с использованием ВЭР характеризуются тем, что ВЭР используются для внешних целей, не связанных с процессами, протекающими в основных технологических аппаратах, которые являются источниками ВЭР (выработка пара в парогенераторах, подогрев воздуха сторонними потребителями и т.п.).

Третье направление – *комбинированные установки*, в которых отходы используются как для внутренних, так и для внешних по отношению к процессу в технологической установке целей (замкнуто-разомкнутые схемы).

### **3.1. Замкнутые схемы утилизации тепловых отходов и применяемое оборудование**

При термической обработке металлов в печах непосредственно для их нагрева используется только 10-15% подведенного тепла; потери в виде теплоты уходящих газов печи составляют до 60-70%; внешние потери (кладки, выбросов и т.д.) – 10-20%. При повышении температуры поступающего для горения воздуха увеличивается коэффициент использования топлива и уменьшается его расход.

Основное наиболее экономичное направление экономии топлива - предварительный подогрев компонентов горения и загружаемого материала.

Предварительный подогрев компонентов горения, например, воздуха, осуществляется в теплообменниках за счет теплоты уходящих газов печей. Повышение температуры воздуха приводит к снижению расхода топлива. Для этих целей наиболее широко



используются следующие теплообменные аппараты: рекуператоры, печные регенераторы, вращающиеся регенераторы, воздухоподогреватели [7].

### Рекуператоры

Рекуператоры применяют для утилизации теплоты уходящих газов для средне- и высокотемпературного применения. Их работа основана на излучении, конвекции или радиационно-конвективном теплообмене.

Схема наиболее простого радиационного рекуператора представлена на рис. 2. Он состоит из двух concentрически расположенных цилиндров. Отработанные горячие газы проходят по внутреннему каналу, отдавая теплоту стенке канала, а затем и воздуху, проходящему по наружному кольцевому каналу. После этого подогретый воздух подается в горелочные устройства печей.

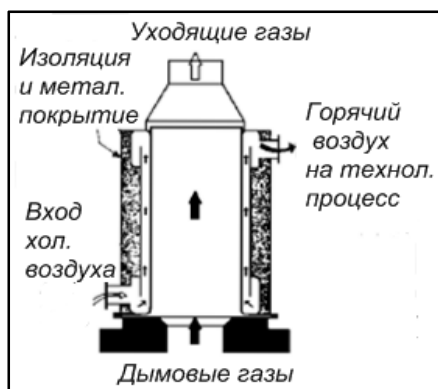


Рис. 2. Радиационный рекуператор

В конвективных трубчатых рекуператорах (рис. 3) горячие газы проходят через пучок труб относительно маленького диаметра, помещенные внутри канала. Поступающий воздух подается в наружный канал и омывает трубы, забирая теплоту у проходящих внутри них горячих газов.

На рис. 4 представлены комбинированные радиационно-конвективные рекуператоры, включающие радиационную секцию,

расположенную ниже конвекционной, что позволяет повысить эффективность процесса теплообмена между средами.

Рекуператоры выполняют из металлических и керамических материалов. Металлические рекуператоры используют при температурах ниже  $1093^{\circ}\text{C}$ , тогда как при более высоких температурах лучше подходят керамические трубчатые рекуператоры. Они выдерживают температуры выше  $1500^{\circ}\text{C}$  на горячей стороне и около  $980^{\circ}\text{C}$  на холодной стороне.



Рис. 3. Конвективный рекуператор

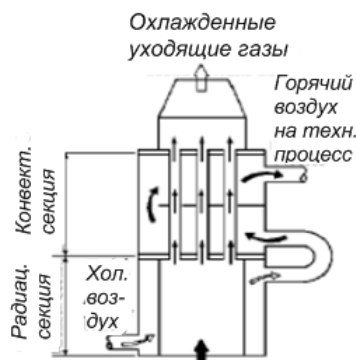


Рис. 4. Комбинированный радиационно-конвективный рекуператор

### Регенераторы

Регенеративные печи включают две камеры с кирпичными кладками, через которые поочередно проходит горячий и холодный поток (рис. 5). При прохождении продуктов сгорания через камеру, кирпичная насадка забирает у них теплоту и нагревается. Затем, поток воздуха подается таким образом, что поступающий для процесса горения воздух проходит через горячую насадку, которая передает ему теплоту. Камеры используются таким образом, что в то время как одна насадка забирает теплоту уходящих газов, другая нагревает воздух. Направление воздушного потока меняется примерно каждые 20 минут.

Регенераторы получили широкое применение в стеклодувных и коксовых печах, и ранее широко использовались в сталеплавильных

мартеновских печах, до тех пор, пока не были вытеснены более эффективными устройствами. Они также использовались для предварительного подогрева горячего дутья в производстве чугуна. Однако в данном случае регенераторы не являлись утилизационным оборудованием ВЭР, так как использовались для предварительного подогрева воздуха, поступающего в печь, т.е. для подогрева компонентов, участвующих в основном технологическом процессе, за счет теплоты уходящих газов. Регенераторы могут быть эффективно использованы для высокотемпературного применения загрязненных газов. Их основным недостатком являются достаточно большие размеры и высокая стоимость по сравнению с рекуператорами.

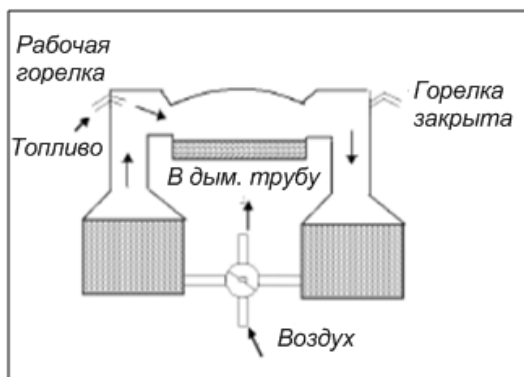


Рис.5. Схема регенеративной печи

Принцип действия вращающихся регенераторов заключается в аккумулировании теплоты с помощью пористой насадки, которая поочередно омывается то горячим, то холодным газом, проходящим через регенератор. Вращающиеся регенераторы часто используются в качестве воздухоподогревателей и представляют собой вращающийся барабан, содержащий насадку и соединяющий прилегающие каналы, по одному из которых движется горячие отработавшие газы, а по другому – холодный газ (рис. 6). Насадка, выполненная из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, вращается между двумя каналами, осуществляя перенос теплоты от горячего газа к холодному. Область

применения таких систем ограничена (низко- и среднетемпературное применение), что вызвано сопротивлением насадок при работе на высоких температурах. Значительные температурные перепады между двумя каналами могут привести к расширению и деформациям, что в свою очередь нарушит целостность уплотнений барабана. При использовании вращающихся регенераторов для высокотемпературных целей, насадка может быть выполнена керамической. Еще одной проблемой таких систем является загрязнение, которое передается от одного потока газа другому через насадку.

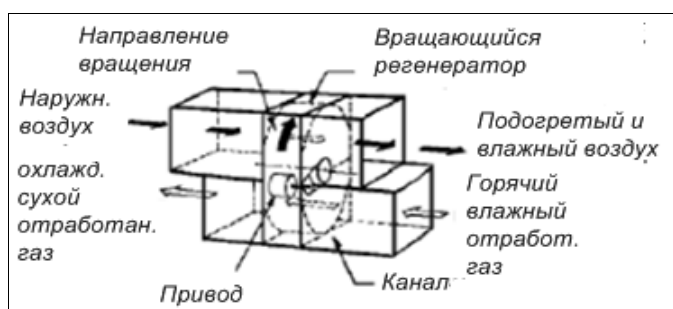


Рис. 6. Вращающийся регенератор

Одним из преимуществ вращающихся регенераторов является то, что они могут быть использованы и для передачи влаги, также как же как и теплоты от незагрязненных газов. При использовании гигроскопических материалов влага может передаваться от одного канала другому. Это дает возможность использовать регенераторы в системах кондиционирования воздуха, когда входной горячий влажный воздух передает теплоту и влагу холодному выходному воздуху. Кроме основного применения в системах отопления помещений и кондиционирования воздуха, вращающиеся регенераторы также используются в ограниченном масштабе и в среднетемпературных системах. Регенераторы разработаны и для высокотемпературных печей, хотя такие системы не нашли широкого распространения в связи с их стоимостью. Регенераторы используются и для утилизации теплоты уходящих газов котлов,

хотя чаще всего более предпочтительны экономичные рекуператоры и экономайзеры.

### **Пассивные подогреватели воздуха**

Пассивные воздухоподогреватели представляют собой утилизационные установки типа «газ-газ» для низко- и высокотемпературного применения в случаях, когда загрязнение одного потока другим недопустимо. Область их применения – отходящие продукты газовых турбин, печей, паровых котлов, утилизация вентиляционного воздуха[9].

Пассивные подогреватели могут быть двух типов - пластинчатые и в виде тепловых труб. Пластинчатые теплообменники состоят из нескольких параллельных пластин, которые образуют отдельные каналы для горячего и холодного потоков газа. Горячие и холодные потоки чередуются между пластинами и требуют значительных площадей для передачи тепла. Такие системы менее чувствительны к загрязнениям, но они зачастую громоздки и более дорогостоящи.

Теплообменник на тепловых трубах представляет собой пучок труб, запаянных с двух сторон. Каждая труба содержит фитиль, который обеспечивает перемещение рабочей жидкости между горячим и холодным концами трубы. Как показано на рис. 7, горячие газы проходят через испарительную зону тепловой трубы, вызывая кипение рабочей жидкости внутри нее. Образующийся в результате пар направляется к «холодному» концу трубы, где конденсируется, отдавая теплоту холодному газу, омывающему конденсационную зону тепловой трубы. Под действием капиллярных сил конденсат возвращается в испарительную зону и цикл возобновляется.

Тепловые трубы нашли применение в следующих системах:

1. Отопительные системы. Теплообменные аппараты с тепловыми трубами используются для передачи теплоты отходящих продуктов для отопительных целей. При этом дополнительное теплообменное оборудование может быть частично или полностью исключено.

2. Подогрев участвующих в технологическом процессе компонентов горения. В данном случае теплообменники с тепловыми трубами утилизируют теплоту отходящих продуктов для предварительного подогрева воздуха, участвующего в данном

или другом технологическом процессе, что приводит к снижению энергопотребления производства.

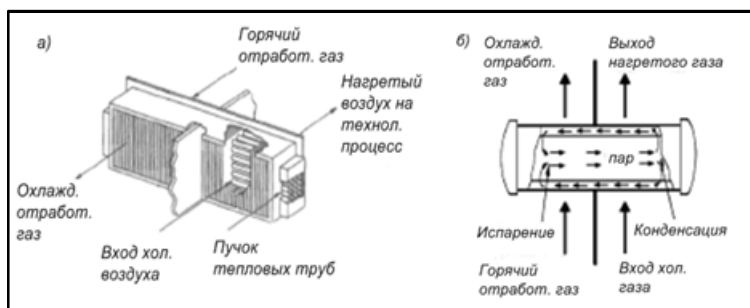


Рис. 7 - Теплообменник на тепловых трубах (а) и тепловая труба (б)

3. Системы охлаждения. Теплообменники на тепловых трубах используются для предварительного охлаждения воздуха в зданиях летом, что позволяет снизить затраты на охлаждение и кондиционирование.

Другими областями применения теплообменников с тепловыми трубами являются:

- предварительный подогрев воздуха для процесса горения в котлоагрегатах;
- утилизация тепловых отходов печей;
- подогрев свежего воздуха для воздушных сушильных установок;
- использование тепловых отходов одних устройств в качестве источника теплоты для других (например, печей);
- охлаждение закрытых помещений за счет наружного воздуха;
- предварительный подогрев питательной воды;
- утилизация отходов процесса осушки;
- утилизация тепловых отходов печей обжига кирпича, отражательных печей.

### Регенеративные/Рекуперативные горелки

Применение горелочных устройств с рекуперативными или регенеративными устройствами является экономически обоснованным и привлекательным. Они более просты в исполнении

и конструкции и более компактны по сравнению с регенеративными печами или рекуператорами и обеспечивают повышение эффективности по сравнению с горелками, работающими на воздухе при параметрах окружающей среды. Рекуперативные горелки содержат теплообменную поверхность, через которую осуществляется нагрев воздуха, идущего на горение за счет теплоты потока газов. Регенеративные горелки устанавливаются парами и работают по принципу краткосрочной аккумуляции энергии дымовых газов в керамических регенераторах тепла подобно регенеративным печам. Как правило, рекуперативные горелки имеют меньшую площадь теплообмена, а регенеративные горелки имеют меньшую массу, чем автономные устройства. Тем не менее, степень рекуперации теплоты в таких горелках ниже, но меньшие затраты и простота эксплуатации делают их весьма привлекательными в системах утилизации тепловых отходов.

### **Трубчатые ребристые теплообменники/Экономайзеры**

Трубчатые теплообменники с оребрением поверхности труб используют для утилизации низко- и среднетемпературного тепла уходящих газов для нагрева жидких сред. Область их применения включает подогрев питательной воды котлов, нагрев технологических жидкостей, нагрев воды для отопления и горячего водоснабжения. Такие теплообменники представляют собой ряд трубок с внешним оребрением, позволяющим увеличить поверхность теплообмена, и, соответственно, коэффициент теплопередачи. Внутри труб движется нагреваемая жидкость, снаружи поверхность трубы омывается дымовыми газами.

### **Котлы-утилизаторы**

Котлы-утилизаторы (например, двухходовые), аналогичны водотрубным котлам, но используются для утилизации средне- и высокотемпературного тепла уходящих газов для производства пара. В случае, когда тепловых отходов недостаточно для производства пара требуемых параметров, могут быть использованы вспомогательные горелки или форсажная камера для обеспечения требуемой производительности котла. Пар может быть в дальнейшем использован для отопительных целей или для производства электрической энергии. Для производства

перегретого пара необходимо установка дополнительного элемента, пароперегревателя.

### **3.2. Разомкнутые схемы утилизации тепловых отходов и применяемое оборудование**

Разомкнутые системы обычно используются для утилизации низкотемпературного отходящего тепла. Значительное количество промышленных тепловых отходов находятся в низкотемпературном диапазоне. Например, в системах сжигания топлива температура уходящих продуктов находится в пределах 150 - 180<sup>0</sup>С. Между тем, значительные запасы тепловой энергии могут содержаться в промышленных системах водяного охлаждения и охлаждающем воздухе.

В случае использования в качестве тепловых отходов выхлопных газов, существенное тепло может быть получено при конденсации водяного пара, содержащегося в газах, при его охлаждении до более низких температур. Обычно охлаждение осуществляют до 120-150<sup>0</sup>С для избежания конденсации паров и осаждения коррозионных веществ на теплообменных поверхностях. Тем не менее, дальнейшее охлаждение газов может существенно повысить степень утилизации (глубину рекуперации) за счет использования скрытой теплоты парообразования, содержащейся в охлаждаемых газах. Этого можно достичь путем использования технологий, позволяющих избежать химического воздействия на теплообменные поверхности при охлаждении газов до температуры, ниже конденсации. При охлаждении газов от 150 до 60<sup>0</sup>С, эффективность рекуперации повышается на 3%. Дальнейшее понижение температуры до 38<sup>0</sup>С приводит к росту эффективности на 11%.

При утилизации низкопотенциальной теплоты возможен ряд проблем, представленных ниже.

1. Коррозия теплообменных поверхностей, о чем было уже сказано выше. Материалы, из которых изготавливают теплообменные аппараты, должны быть коррозионно-стойким, или должна быть обеспечена возможность периодической замены элементов, подверженных химическому воздействию, что является экономически необоснованным.



2. Необходимы значительные площади теплообменных поверхностей. При утилизации низкопотенциальных тепловых отходов разность температур между средами довольно небольшая, что и приводит к увеличению площади теплообмена, что, в свою очередь, снижает экономическую привлекательность внедрения таких систем утилизации.

3. Необходимость наличия потребителя низкопотенциального тепла. Утилизация низкопотенциальных тепловых отходов становится целесообразной лишь в случае наличия конечного потребителя этого тепла. Такими потребителями могут быть системы горячего водоснабжения, отопления. Весьма привлекательным является использование тепловых насосов, позволяющих повысить температурный уровень для удовлетворения нагрузки более высокотемпературных потребителей.

Существующие технологии позволяют охлаждать газы до температуры ниже температуры точки росы при утилизации низкотемпературных тепловых отходов. Такими устройствами являются экономайзеры, контактные рекуператоры прямого и косвенного действия, и недавно разработанные конденсаторы мембранного типа.

### **Экономайзеры**

Экономайзеры используют для охлаждения продуктов сгорания до температуры 65 - 75<sup>0</sup>С и они являются стойкими к воздействию кислот, содержащихся в продуктах сгорания и оседающих на поверхностях нагрева. Это достигается следующими путями:

- установкой «одноразовых» секций на холодном конце экономайзера. Трубка на холодном конце будет подвергаться химическому воздействию и ее необходимо постоянно заменять. Частота замены зависит от состава продуктов сгорания и конструкционного материала;

- использованием труб, выполненных из нержавеющей стали. Нержавеющая сталь более устойчива к кислотным газам, чем малоуглеродистая сталь, часто применяемая в аналогичном оборудовании;

- использованием углеродистой стали для большинства теплообменников, но с использованием труб из нержавеющей стали на холодном конце, где будут иметь место окисление;
- использованием стеклотрубных теплообменников (в основном для применения «газ-газ», например, для воздушных подогревателей);
- использованием передовых материалов, например, тефлона.
- 

### **Контактные теплообменники косвенного действия**

Контактные теплообменники косвенного действия позволяют охлаждать газы до температуры 38-43<sup>0</sup>С. В этом диапазоне водяные пары, содержащиеся в газах, будут конденсироваться практически полностью. Теплообменные аппараты могут быть выполнены из нержавеющей стали, стекла, тефлона или других современных материалов.

### **Контактные теплообменники прямого действия**

В контактных теплообменниках прямого действия осуществляется непосредственное смешивание пара (газа) и охлаждающей жидкости.

Такие теплообменники не имеют разделительной стенки, через которую осуществляется теплообмен, что позволяет решить проблемы, связанные с необходимостью больших теплообменных поверхностей. Поступающие в теплообменник газы охлаждаются водой, подаваемой в верхнюю часть аппарата. Нагретая вода выводится через нижнюю часть теплообменника и направляется к внешнему потребителю. Недостатком таких систем является возможность загрязнения воды вредными веществами, содержащимися в дымовых газах.

### **Трансформаторы теплоты**

Теплообменные аппараты, описанные выше, позволяют передавать энергию от более нагретых потоков к менее нагретым. Это ограничивает возможности рекуперации тепла в том случае, когда температура отходящего тепла ниже температуры, необходимой для покрытия отопительной нагрузки. (Например, тепловые отходы могут иметь температуру 32<sup>0</sup>С, в то время как

горячая вода требуется при температуре 82<sup>0</sup>С). В таких случаях, тепловой насос позволяет повысить температурный уровень тепловых отходов до нужной температуры конечного потребителя. Тепловые насосы используют внешние источники энергии, и в них реализуется цикл, в котором энергия от низкотемпературных источников передается источнику с более высокой температурой [3].

В зависимости от конструкции, трансформаторы теплоты могут выполнять две функции:

1) получение теплоты более высокого температурного уровня (тепловые насосы),

2) использование тепловых отходов для привода абсорбционных холодильных систем (холодильные машины). Наиболее широкое применение трансформаторы теплоты с низкопотенциальными источниками энергии получили в химической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности.

Использование трансформаторов теплоты могут быть экономически обосновано в зависимости от требуемого температурного перепада и существующих тарифов на топливо и электрическую энергию. В случае, когда требуемая тепловая нагрузка незначительно превышает тепловой уровень имеющихся отходов, использование тепловых насосов будет более оправданным по сравнению с прямым сжиганием топлива в котлах или использованием электрод котлов для производства требуемого тепла.

Коэффициент преобразования (обозначается в зарубежной литературе COP, в отечественной - φ) является показателем эффективности трансформации теплоты и определяется отношением тепло- или холодопроизводительности к затраченной работе.

$$COP = \frac{Q}{W},$$

где  $Q$  – производительность трансформатора теплоты;  $W$  – затраченная работа.

На эффективность работы теплового насоса оказывает существенное влияние температурный уровень тепловых отходов и требуемый температурный «подъем». Выбранный цикл и рабочее вещество определяют температуру подвода и отвода теплоты, а также максимально достижимое значение температурного «подъема». Эффективность трансформатора теплоты уменьшается при увеличении разницы между температурами кипения и конденсации рабочего вещества. Разработки и внедрение высокоэффективных циклов и рабочих веществ позволят расширить возможности использования тепловых отходов для утилизации низкопотенциальных тепловых отходов.

Значительный интерес представляет использование трансформаторов теплоты по первому направлению, что может быть реализовано как по замкнутому циклу, так и по открытому циклу.

### **Замкнутый компрессионный цикл**

Замкнутый компрессионный цикл применяется, например, для утилизации теплоты охлаждающей воды стерилизаторов в молочной промышленности. В процессе охлаждения стерилизаторов вода нагревается до температуры  $53^{\circ}\text{C}$ . Тепловой насос используется для охлаждения этой воды с одновременной выработкой теплоты более высокого потенциала для обеспечения тепловых нужд предприятия. Тепловой насос включает в себя испаритель, компрессор, конденсатор и расширительный вентиль. В испарителе энергия тепловых отходов передается рабочему веществу – хладагенту. Затем хладагент направляется в компрессор, где повышается его температура, после чего перегретые пары хладагента проходят через конденсатор, где отдают теплоту нагреваемой среде. Проходя через расширительный вентиль рабочее вещество дросселируется и возвращается в испаритель, и цикл замыкается.

### **Открытые циклы рекомпрессии пара**

Такие системы используются для повышения давления отработанного пара. Сжатие пара может осуществляться тепловой или механической компрессией. В аппарате с термической компрессией вторичного пара рабочее вещество сжимается в

паровом эжекторе, в аппарате с механической компрессией вторичного пара сжатие осуществляется с помощью компрессора, приводимого в действие электродвигателем.

### **Абсорбционные трансформаторы теплоты**

Принцип действия абсорбционных трансформаторов теплоты аналогичен работе замкнутого компрессионного цикла, за исключением того, что компрессор заменяется более сложным механизмом, приводящимся в действие тепловой энергией [6]. В зависимости от потребностей предприятия, система может работать в нескольких режимах. В режиме 1 трансформатор теплоты преобразует низкопотенциальное тепло в теплоту более высокого потенциала. В режиме 2 тепло среднего потенциала преобразуется в тепло низкого и высокого потенциала. В таком режиме система работает для систем кондиционирования и производства холода, что находит особенно широкое применение на предприятиях пищевой промышленности, располагающих значительными ресурсами тепловых отходов и имеющих потребность в производстве холода. Одним из перспективных направлений утилизации тепловых отходов является создание тригенерационных систем, позволяющих осуществлять совместную выработку тепловой, электрической энергии и холода. Пример создания тригенерационной системы на базе газо-поршневого агрегата с блоком утилизации тепла в котле-утилизаторе вне контура двигателя представлен на рис. 8.

## **4 УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Как было отмечено ранее, значительное количество тепловых отходов в промышленности – это низкопотенциальное тепло. Например, физическое тепло уходящих газов котлов с температурой 150-180<sup>0</sup>С. В то же время, значительные запасы теплоты содержатся в охлаждающей воде промышленного оборудования и охлаждающем воздухе [12].

Низкопотенциальное тепло можно условно разделить на два диапазона:

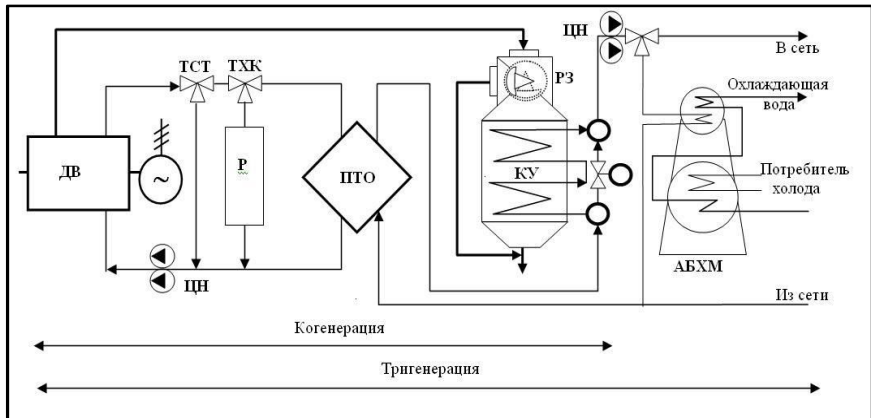


Рис. 8. Упрощенная принципиальная схема тригенерации: ДВ - двигатель; КУ - котел-утилизатор; Р - радиатор; РЗ - регулирующая заслонка; ПТО - промежуточный теплообменник; ТСТ - термостат; ТХК - трехходовой клапан; ЦН - циркуляционный насос.

1. Тепло с температурой от 40 до 150<sup>0</sup>С, которое может быть непосредственно использовано для отопительных целей. В данном случае при утилизации теплоты осуществляется перенос теплоты от источников с более высокой температурой к источникам с более низкой температурой.

Основными источниками таких отходов являются:

- отработанный пар;
- нагретая вода;
- отходящие газы паровых и газовых турбин.

2. Тепло с температурой ниже 40<sup>0</sup>С, которое не может быть напрямую использовано для отопления и горячего водоснабжения, так как его температура ниже требуемой у потребителя. Часто это тепло сбрасывается в окружающую среду. Например, на предприятии могут иметься в наличии значительные запасы тепловых отходов при температуре 30<sup>0</sup>С, в то время как для других процессов может требоваться горячая вода с температурой 60<sup>0</sup>С и выше. В таком случае может быть использован тепловой насос, который позволяет повысить температурный уровень тепла в соответствии с требованиями потребителей. Для привода теплового насоса требуются затраты внешней энергии. В зависимости от

конструкции, трансформаторы теплоты могут выполнять две функции: получение теплоты более высокого температурного уровня, или использование тепловых отходов для привода абсорбционных холодильных систем.

Данный раздел посвящен изучению технологий утилизации низкопотенциальных тепловых отходов с температурой до 40°C.

#### **4.1. Тепловой насос**

Тепловой насос это устройство, позволяющее повысить температуру источника тепловых отходов до температуры, требуемой потребителю. Т.е., полезное использование тепловых отходов позволяет заместить затраты на покупку энергии. Однако такое повышение температурного уровня невозможно осуществить без затрат извне. Тепловой насос требует наличия внешнего источника механической или тепловой энергии. Главной задачей является разработка такой системы, в которой экономический эффект от внедрения теплового насоса превысит затраты на его привод.

Существует несколько типов тепловых насосов, некоторые из них требуют подвода внешней механической работы, другим требуются затраты тепловой энергии.

Тепловые насосы полезно используют тепловые отходы, которые были бы выброшены в атмосферу и повышают их температуру до уровня, при котором тепло может быть полезно использовано. Тепловая энергия, полученная с помощью теплового насоса, обходится дешевле, чем ее производство путем сжигания топлива или в электрических котлах.

В основе работы трансформаторов теплоты лежит термодинамический цикл, известный как обратный цикл Карно.

В цикле Ренкина снижение температурного потенциала тепловой энергии приводит во вращение вал турбины, что сопровождается производством механической энергии. В паровой турбине, это достигается путем подачи в нее пара высокого давления и выпуска пара с более низким давлением. Механические тепловые насосы работают наоборот. Они преобразуют низкопотенциальные тепловые отходы в полезное тепло с более высокой температурой, на что расходуется механическая энергия вращения вала (рис.9) [3].

Количество работы, требуемой для привода теплового насоса, зависит от того, насколько повышается температура низкопотенциального источника энергии, так же как в паровой турбине количество производимой работы возрастает с увеличением степени изменения давлений.

Все тепловые насосы осуществляют три основные функции:

- Получение энергии от источника тепловых отходов;
- Повышение температуры тепловых отходов;
- Обеспечение полезной тепловой энергии при повышенной температуре.

Принцип действия компрессионного теплового насоса, как одного из наиболее широко применяемых типов, представлен на рис. 10.

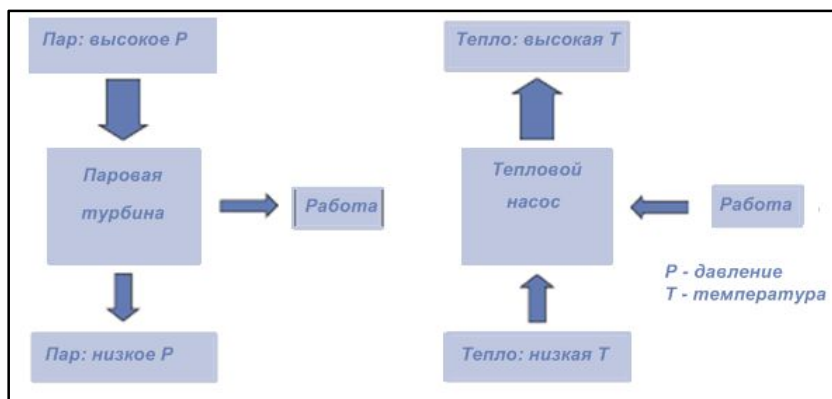


Рис. 9. Сравнение принципов работы цикла теплового двигателя и цикла теплового насоса

Энергия тепловых отходов подводится к рабочему веществу в испарителе, в результате чего хладагент кипит и испаряется. В компрессоре давление пара повышается, соответственно возрастает и температура. После этого рабочий пар конденсируется в конденсаторе, передавая теплоту нагреваемой среде.

Ключевым параметром, оказывающим влияние на эффективность работы теплового насоса, как уже было отмечено ранее, является разность температур испарения и конденсации рабочего вещества.



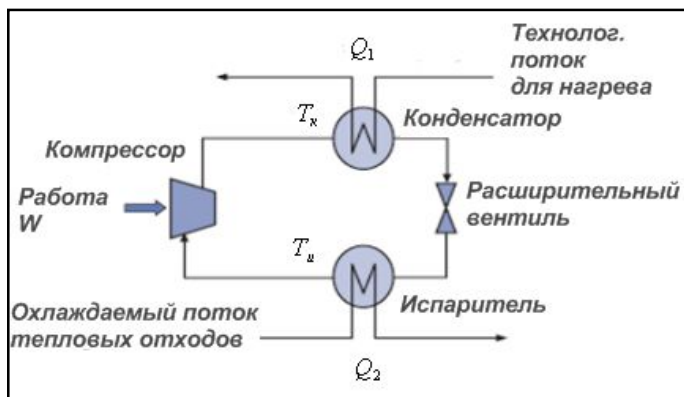


Рис.10. Принципиальная схема компрессионного теплового насоса

Здесь  $Q_2$  – подводимая энергия тепловых отходов;

$T_k$  – температура конденсации рабочего вещества;

$T_n$  – температура испарения рабочего вещества;

$W$  – работа, затрачиваемая компрессором для сжатия рабочего вещества;

$Q_1$  – производимое тепловым насосом тепло.

$$Q_1 = Q_2 + W$$

Эффективность работы теплового насоса, как было отмечено ранее, характеризуется коэффициентом преобразования COP ( $\varphi$ ):

$$\text{COP} = \varphi = \frac{Q_1}{W} > 1.$$

## 4.2 Основные типы промышленных тепловых насосов

Ниже представлены основные типы тепловых насосов и кратко описан принцип их работы:

- Замкнутый цикл теплового насоса: осуществляет механическое сжатие рабочей жидкости для повышения температуры. Рабочей средой чаще всего является хладагент. Наиболее распространенные типы механических двигателей,

которые могут быть использованы для работы теплового насоса, включают электродвигатели, паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки.

- Незамкнутый цикл с механической компрессией пара. Для повышения давления пара используется механическая энергия. Рабочей средой в испарителе чаще всего является водяной пар. Такие системы называются незамкнутыми, так как рабочая жидкость является технологическим потоком.

- Незамкнутые термокомпрессионные тепловые насосы используют энергию рабочего пара высоких параметров для повышения давления холодного пара в эжекторе. Как и в предыдущем случае, тепловой насос работает по разомкнутому циклу.

- Замкнутые абсорбционные тепловые насосы используют двухфазные рабочие жидкости и принцип повышения точки кипения и теплоты поглощения для повышения температуры для удовлетворения нужд потребителей при более высоких температурах. Принцип их работы аналогичен принципу действия паровых абсорбционных холодильных машин, использующих водный раствор бромида лития (или водоаммиачную смесь) в качестве рабочей среды.

Основная особенность абсорбционных систем заключается в возможности получения более высоких температур по сравнению с другими тепловыми насосами, так как их коэффициент преобразования изменяется не существенно при возрастании температурного уровня рабочей среды, поэтому они используются чаще всего для комбинированной выработки тепла и холода.

Основные элементы любого абсорбционного теплового насоса – это следующие теплообменные аппараты: испаритель, конденсатор, генератор и абсорбер (рис. 11). Высокотемпературная первичная энергия (пар или топливо) подается в десорбер (генератор), где происходит выпаривание рабочего вещества при высоком давлении.

Пар с высоким давлением поступает в конденсатор, где его теплота передается потребителю. Высокотемпературный конденсат дросселируется до более низкого давления, соответствующего давлению в испарителе, и направляется в испаритель, в который подводится утилизируемое тепло, и рабочее вещество кипит. В

абсорбере концентрированная рабочая жидкость, поступающая из десорбера (генератора), поглощает пар, идущий из испарителя, при этом выделяется теплота, отводимая потребителю. Рабочая жидкость возвращается в десорбер и цикл замыкается.

В абсорбционных трансформаторах теплоты наиболее широко применяемых в промышленности, энергия тепловых отходов подводится к испарителю, а высокопотенциальных источник энергии – к генератору. В результате в абсорбере и конденсаторе происходит сброс среднетемпературного тепла, что происходит аналогично процессам в термокомпрессионных тепловых насосах, в которых пар высокого давления используется для повышения температуры и давления холодного пара, идущего из испарителя.

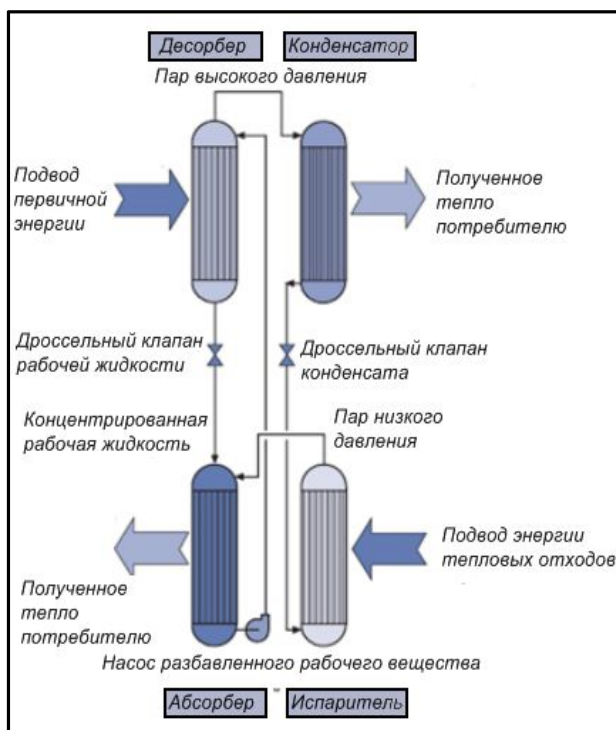


Рис. 11. Принципиальная схема абсорбционного трансформатора теплоты

Одной из существенных возможностей абсорбционных трансформаторов тепла является возможность охлаждения на «холодном конце» (испарителе) и нагрев на «теплом конце» (абсорбер, конденсатор), например, воды.

Возможность одновременного производства и холода и тепловой энергии обеспечивает дополнительные преимущества по сравнению с тепловыми насосами, используемыми только для производства теплоты, и повышает экономические показатели установки.

Еще одной опцией абсорбционных систем является возможность разделения среднетемпературного потока на высоко- и низкотемпературный, путем регулирования давления и концентрации рабочего вещества в смеси.

### **4.3. Применение тепловых насосов в процессах сушки**

Тепловые насосы получили широкое распространение в процессах осушения и сушки различных материалов (например, пиломатериалов). При таком применении, теплый влажный отработанный воздух после сушильной установки является источником теплоты для замкнутого теплового насоса с механическим приводом, который передает эту теплоту свежему воздуху [7,8].

#### **4.3.1 Замкнутый цикл компрессионного теплового насоса для сушки пиломатериалов**

Сушка пиломатериалов осуществляется путем подачи нагретого воздуха через уложенные в закрытом помещении пиломатериалы. В печах с паровым обогревом, свежий воздух нагревается паром и подается в сушилку. Горячий воздух испаряет влагу из древесины и выбрасывается в атмосферу. На рис. 12 представлена схема использования замкнутого цикла механического (компрессионного) теплового насоса для сушки пиломатериалов.

Влажный вытяжной воздух печи проходит через испаритель теплового насоса, охлаждаясь, при этом содержащаяся в нем влага конденсируется. Сжатый в компрессоре поток рабочего вещества конденсируется, отдавая теплоту свежему воздуху, обеспечивая, таким образом, подачу горячего воздуха в сушилку. Стоимость

электроэнергии для привода теплового насоса значительно меньше, чем стоимость используемого пара в печи без теплового насоса.

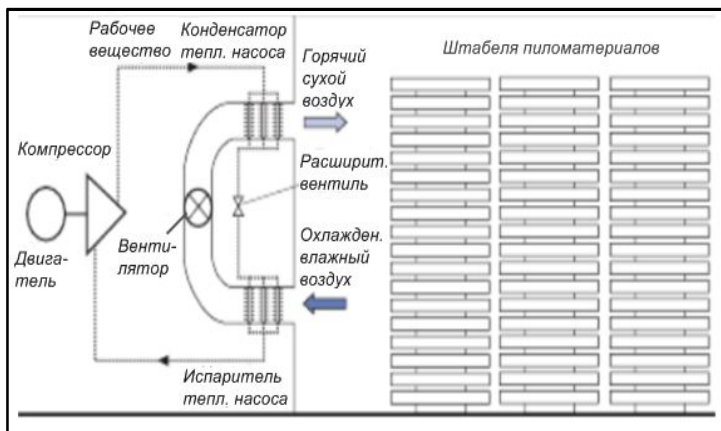


Рис. 12. Принципиальная схема применения замкнутого цикла теплового насоса для подогрева воздуха для сушки пиломатериалов

#### 4.3.2 Разомкнутый испарительный цикл с механической компрессией пара для концентрирования сахарного раствора

В процессе рафинирования сахара, перед окончательной кристаллизацией из сахарного раствора необходимо выпарить значительное количество воды. На рис. 13 представлена схема испарительного открытого цикла с механической компрессией в сравнении с выпариванием по ступеням (многокорпусным выпариванием).

В многокорпусных установках пар подается в первый корпус установки для выпаривания воды и получения пара. Образующий вторичный пар направляется в теплообменник второго корпуса, в котором поддерживается более низкое давление с помощью вакуумного конденсатора. Оставшаяся в продукте влага доиспаряется, аналогичные процессы протекают и в остальных корпусах.

В открытом испарительном цикле с компрессией, сжатый пар после компрессора конденсируется, выпаривая из раствора

жидкость. Образующийся пар направляется на всасывание в компрессор. В компрессоре пары сжимаются до давления, соответствующего температуре, при которой пар конденсируется, испаря при этом поступающую в аппарат жидкость.

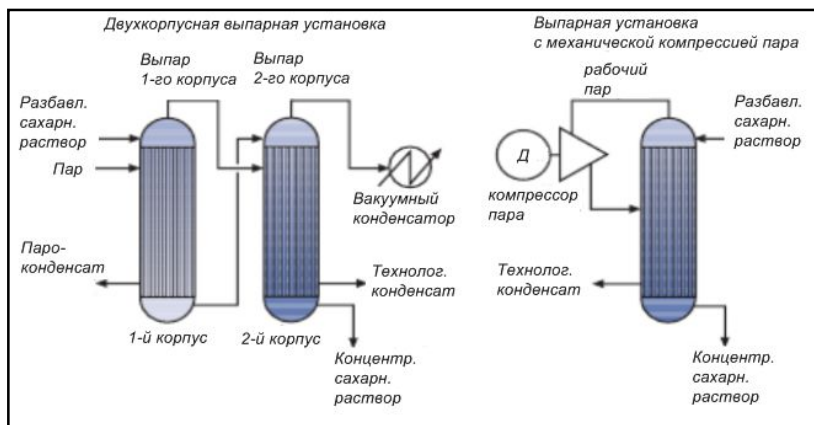


Рис. 13. Использование механической компрессии в выпарных установках

Затраты на привод компрессора ниже, чем затраты на греющий пар, использующийся в многокорпусных системах. Однако, энергетические затраты не являются единственным фактором, который должен приниматься во внимание. Должна быть проведена тщательная оценка всех преимуществ и недостатков той или иной системы, прежде чем будет выбрана выпарная система для определенной области применения.

### 4.3.3 Термокомпрессионный тепловой насос для утилизации пара бумагосушильных установок

Работа термокомпрессионного теплового насоса аналогична работе насоса с механической компрессией, при которой пар сжимается, а затем конденсируется при высоком давлении и температуре. Однако, вместо механической энергии для сжатия пара термокомпрессор использует энергию, полученную при снижении давления какого-либо высокотемпературного потока.

На рис. 14 представлена схема использования термокомпрессора для утилизации теплоты вторичного пара бумагосушильной установки. Пар подается в сушильный барабан при определенном давлении, задаваемом условиями сушки. В процессе сушки пароконденсатная смесь из секции высокого давления переходит в секцию более низкого давления. Пройдя секцию высокого давления Б, пар повторно сжимается в термокомпрессоре за счет энергии первичного пара высокого давления, что позволяет достичь высокой степени утилизации теплоты отработанного пара и повысить КПД сушильной установки.

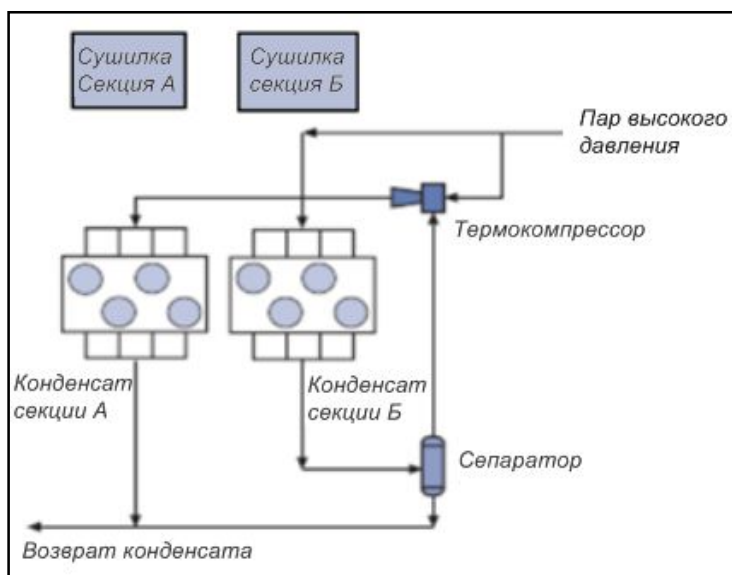


Рис. 14. Использование термокомпрессора в бумагосушильных установках

#### 4.4. Рабочие вещества тепловых насосов

Осуществление замкнутого компрессионного трансформатора теплоты требует наличия рабочего вещества. Чаще всего в качестве рабочих веществ тепловых насосов используются:

ХФУ-12 - низко- и среднетемпературные вещества (максимальная температура 80°C);

ХФУ-114 – высокотемпературные (120°C);

R-500 – среднетемпературные (80°C);

R-502 – низкотемпературные (55°C).

ГХФУ-22 – подходит практически для всех реверсивных и низкотемпературных трансформаторов теплоты.

Благодаря содержанию хлора и химической стабильности, ХФУ (хлорфторуглероды) оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Они обладают высоким показателем разрушения озонового слоя (ODP) и глобального потепления (GWP). Их воздействие на окружающую среду также характеризуется общим коэффициентом эквивалентного потепления (TEWI), указывающим на общее воздействие выбора ХФУ на глобальное потепление. TEWI представляет собой сумму двух составляющих: прямого воздействия парниковых газов, используемых при эксплуатации систем и косвенного воздействия выбросов двуокиси углерода при производстве энергии, требуемой для привода системы в течение всего периода ее эксплуатации.

Потенциал озонового истощения (ODP) представляет собой число, которое определяет воздействие хладагента на озоновый слой. R12 имеет индекс 1,0; все остальные результаты получаются методом сравнения с ним.

Потенциал глобального потепления (GWP) представляет собой число, которое определяет вклад хладагента в парниковый эффект. CO<sub>2</sub> имеет индекс 1,0; все остальные результаты получаются методом сравнения с ним.

**Хлорфторуглероды (ХФУ).** ХФУ относятся к группе запрещенных хладагентов. Из-за высокого показателя разрушения озонового слоя, производство этих хладагентов и их использование в новых установках сейчас запрещено, хотя их все еще допускается использовать в уже эксплуатируемых системах. Эта группа включает в себя следующие хладагенты: R-11, R-12, R-13, R-113, R-114, R-115, R-500, R-502, R-13B1.

**Гидрохлорфторуглероды (ГХФУ).** ГХФУ также содержат хлор, но потенциал разрушения озонового слоя для них значительно ниже, чем для ХФУ, чаще всего на 2-5% от этого показателя у ХФУ, так как они менее стабильны химически в атмосфере. Потенциал глобального потепления в среднем составляет 20% от величины для ХФУ. Гидрохлорфторуглероды являются так называемыми



переходными хладагентами. Они могут использоваться только при модернизации объектов, на которых они работают. К ГХФУ относят: R-22, R-401, R-402, R-403, R-408 и R-409. Согласно Монреальскому протоколу, ГХФУ должны быть выведены из обращения в странах с развитой промышленностью к 2020 году, и полностью выведены из обращения к 2040 году. Страны европейского союза приняли схему ускоренного вывода этих веществ из обращения, согласно которой их использование должно быть прекращено к январю 2015 года. Некоторые европейские страны, например Швеция, Германия, Дания, Швейцария и Австрия, приняли еще более ускоренные схемы и исключили эти хладагенты из обращения в 1998-2002 гг.

**Гидрофторуглероды (ГФУ).** ГФУ считаются долгосрочными альтернативными хладагентами. Это связано с тем, что они не содержат хлора и к ним относят такие хладагенты, как R-134a, R-152a, R-32, R-125 и R-507. Так как они не вызывают разрушения озонового слоя, эти вещества могут применяться в качестве альтернативы веществам R-12, R-22 и R-502. Тем не менее, и они вносят свой вклад в глобальное потепление. Особое внимание должно уделяться смазочным материалам, взаимодействующим с этими веществами в ходе реализации цикла. Минеральные масла не растворяются этими хладагентами. Только рекомендованные производителями хладагентов смазочные масла на основе эфира должны применяться с этими хладагентами. Остатки минеральных масел должны удаляться во время модернизации или планового ремонта оборудования. Ни де более подробно представлены некоторые из них.

**Гидрофторуглерод R-134a** – вещество, по своим термодинамическим и физическим свойствам похожее на ХФУ R-12. Коэффициент преобразования теплового насоса, работающего на R-134a, практически не отличается от коэффициента преобразования (COP) при работе на R-12. При низких температурах кипения (ниже  $-1^{\circ}\text{C}$ ) и/или значительной разности температур кипения и конденсации, COP снижается незначительно.

**Гидрофторуглерод R-152a** – в основном использовался как один из компонентов смеси R-500, хотя нашел применение и ряде небольших тепловых насосов и домашних холодильников. На сегодняшний день используется как компонент смеси. Из-за его

горючести, в чистом виде его допускается использовать лишь в небольших системах с малым количеством вещества в системе.

**Гидрофторуглерод R-32** – умеренно горючее вещество, имеет потенциал глобального потепления (GWP) близкий к нулю. Он рассматривается в качестве подходящей долгосрочной замены ГХФУ R-22 в системах кондиционирования воздуха, промышленных тепловых насосах и холодильных системах. Из-за его горючести, ГФУ R-32 обычно применяется в качестве основного компонента негорючих смесей, является заменой R-502 и ГХФУ R-22.

**Гидрофторуглероды R-125 и R-143a** имеют свойства, близкие к свойствам веществ R-502 и ГХФУ R-22. Применяются в основном в качестве компонентов тройных смесей и являются заменой R-502 и ГХФУ R-22. Однако, потенциал глобального потепления у этих веществ почти в три раза превышает R-134a.

### **Смеси**

Смеси предоставляют широкие возможности для замены хлорфторуглеродов как при модернизации, так и при вводе нового оборудования. Смеси состоят из двух или более чистых рабочих веществ и могут неазеотропными, азеотропными и близкими к азеотропным. Азеотропные смеси имеют постоянную температуру кипения и конденсации, у остальных температура изменяется (имеется температурный глайд). Преимущество смесей заключается в том, что их можно выполнять на заказ в соответствии с потребностями потребителя.

Ранее, все смеси, используемые для замены R-12 и R-502, содержали R-22 и/или другие гидрохлорфторуглероды, такие как R-124 и R-142b, и поэтому относились к переходным и среднетемпературным рабочим веществам.

Новое поколение смесей, заменяющих R-502 и R-22, не содержит хлорсодержащих компонентов, и в основном включает гидрофторуглероды (R-32, R-125, R-134a, R-143a) и гидрокарбонаты (например, пропан). Наиболее перспективными альтернативными рабочими веществами, в конечном итоге заменяющими R-22 в тепловых насосах, являются смеси R-410A и R-407C, которые будут рассмотрены более подробно ниже. Основное различие между ними – их химический состав: R-410A представляет собой смесь R-32 и R-134a с незначительным

температурным глайдом (температурой скольжения), в то время как R-407C состоит из R-32, R-125 и R-134a и имеет большое значение температурного глайда.

R-407C единственное рабочее вещество, доступное для немедленной замены R-22 на существующих предприятиях. Его термодинамические и эксплуатационные характеристики наиболее приближены к свойствам R-22. Тем не менее, наличие у R-407C температурного глайда несколько ограничивает сферу его применения. Область использования этого хладагента постоянно расширяется, несмотря на все еще существующие трудности для производителей и компаний, обслуживающих оборудование, работающее на данном веществе.

Исследования показали, что применение R-410A позволяет получить более высокие значения COP по сравнению с R-22. Использование этого рабочего вещества приведет к общему снижению затрат, так как отдельные элементы системы, в частности компрессор, могут быть уменьшены в размерах, так как такие компрессора имеют более высокую объемную производительность. Основным недостатком работы системы на R-410A является высокое рабочее давление по сравнению с R-22, в связи с чем, требования к герметичности отдельных узлов системы должны быть пересмотрены. R-410A является очень востребованным рабочим веществом в компактных тепловых насосах и установках кондиционирования.

### **Природные рабочие вещества**

К природным рабочим веществам относят вещества, существующие в биосфере. Они, как правило, имеют незначительные показатели воздействия на окружающую среду (нулевой или близкий к нулю GWP). Они являются долгосрочными альтернативами ХФУ. Примерами природных рабочих жидкостей являются аммиак, пропан, двуокись углерода, воздух и вода. Некоторые из них являются воспламеняемыми и токсичными. Безопасная эксплуатация таких жидкостей может требовать специальных конструкций системы и доступность их для эксплуатации и ремонта.

*Аммиак (NH<sub>3</sub>)* во многих странах является лидирующим рабочим веществом в крупных и средних системах холодоснабжения и

холодоаккумулирования. Нормы, правила и законодательство разработаны с учетом таких свойств аммиака как токсичность и воспламеняемость. С точки зрения термодинамики цикла и экономической эффективности аммиак является отличной альтернативой ХФУ и R-22 в современном теплонасосном оборудовании. До сих пор аммиак применялся только в крупных системах, и в компрессорах высокого давления температуру конденсации удалось повысить с 58 до 78<sup>0</sup>С.

Рассматриваются возможности использования аммиака в небольших теплонасосных системах, которые занимают значительную часть рынка теплонасосного оборудования. Достичь безопасной эксплуатации таких систем возможно при зарядке системы небольшим количеством рабочего вещества, использованием косвенных (рассольных) систем, газонепроницаемых помещений и корпусов оборудования, стабильной и устойчивой работы систем вентиляции. Медь не совместима с аммиаком, поэтому основные элементы системы должны выполняться из стали. Аммиак пока не используется в высокотемпературных промышленных тепловых насосах, так как на сегодня нет подходящих для этих целей компрессоров, работающих на давлениях 40 бар и выше. Разработка и внедрение таких компрессоров сделают аммиак привлекательным рабочим веществом для тепловых насосов.

*Углеводороды (ГУ)* – это хорошо известные рабочие вещества с подходящими термодинамическими свойствами и совместимые с другими материалами. На сегодняшний день пропан, пропилен и смеси пропана, бутана, изобутана и этана являются самыми многообещающими рабочими веществами тепловых насосов. ГУ широко используются в нефтяной промышленности, встречаются случаи применения их в системах охлаждения на транспорте, бытовых холодильниках/ морозильниках и тепловых насосах (особенно в Европе). Из-за легкой воспламеняемости системы при работе на углеводородах должны быть модернизированы либо допускается их применение в системах с зарядкой небольшим количеством вещества. Для обеспечения безопасной эксплуатации и обслуживания должны быть приняты меры безопасности, такие как специальное размещение и/или ограждение теплонасосного оборудования, надежные системы вентиляции, добавление

индикаторных газов в рабочие вещества, использование детекторов газа и т.д.

*Вода (R718)* является превосходным рабочим веществом высокотемпературных тепловых насосов благодаря своим термодинамическим характеристикам, невоспламеняемости и нетоксичности. Чаще всего вода как рабочее вещество применяется в открытых и полуоткрытых циклах с механической рекомпрессией пара, хотя имеются примеры использования воды и в закрытых циклах компрессионных тепловых насосов. Диапазон рабочих температур составляет 80-150<sup>0</sup>С. Температура 300<sup>0</sup>С была получена в пилотном проекте в Японии, и сегодня наблюдается растущий интерес к воде как к рабочему веществу, особенно для высокотемпературных тепловых насосов. Основным недостатком воды как хладагента является объемная производительность воды (кДж/м<sup>3</sup>), требующая использования компрессоров очень больших размеров и существенных затрат особенно при работе на низких температурах.

*Углекислота (CO<sub>2</sub>)* является перспективным хладагентом, внимание к которому неуклонно растет во всем мире. CO<sub>2</sub> является нетоксичным, невоспламеняемым и совместимым с большинством применяемых смазочных масел и конструкционных материалов веществом. Объемная холодопроизводительность у него достаточно высокая, в то время как степень сжатия значительно снижена. Тем не менее, коэффициент преобразования (COP) цикла теплового насоса, работающего на CO<sub>2</sub>, значительно ниже и эффективность использования этого рабочего вещества зависит уровня развития соответствующих методов для достижения низкого энергопотребления при работе ниже и выше критической точки. Использование углекислоты в тепловых насосах все еще находится в стадии исследования и усовершенствования систем и их компонентов. Прототип теплового насоса для нагрева воды разработан в Норвегии. Сегодня углекислота используется в качестве хладагента верхней ветви каскадных холодильных машин.

Общим требованием к тепловым насосам, работающим на альтернативных хладагентах, является обеспечение в них такой же надежности и экономической эффективности, как при работе на ГХФУ или ХФУ. Более того, энергетическая эффективность систем с альтернативными хладагентами должна быть на том же уровне

или даже выше, что позволит сделать тепловые насосы перспективной энергосберегающей альтернативой. Однако кроме поиска новых и экологически безопасных рабочих веществ, должна осуществляться и модернизация и адаптация к ним тепловых насосов, так как эффективность работы теплового насоса больше зависит от его конструкции типа, чем от рабочего вещества, которое в нем используется.

## **5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Использование тепловых отходов для производства электроэнергии - это процесс сбора сбросного тепла технологических процессов и использование этого тепла для производства электрической энергии (рис. 15). Энергоемкие промышленные процессы – такие, как процессы имеющие место на нефтеперерабатывающих предприятиях, сталелитейных заводах, стеклодувных производств, цементных печах – являются источниками тепловых отходов и горячих отработанных газов, которые могут быть использованы в современных технологиях производства электроэнергии. Утилизация тепловых отходов для таких целей представляет собой неиспользованную разновидность комбинированной выработки энергии (когенерации), в которой один источник энергии (топливо) используется для совместной выработки тепла (холода) и электрической энергии.

Когенерационная система состоит из первичного источника, генератора, системы утилизации тепла и электрического взаимосвязанного оборудования, собранного в интегрированную систему. Для комбинированной выработки характерны более высокие КПД и возможности избежания или снижения потерь при транспортировке энергии от источника к потребителю, в результате чего снижается расход первичного топлива и выброс в атмосферу вредных веществ.

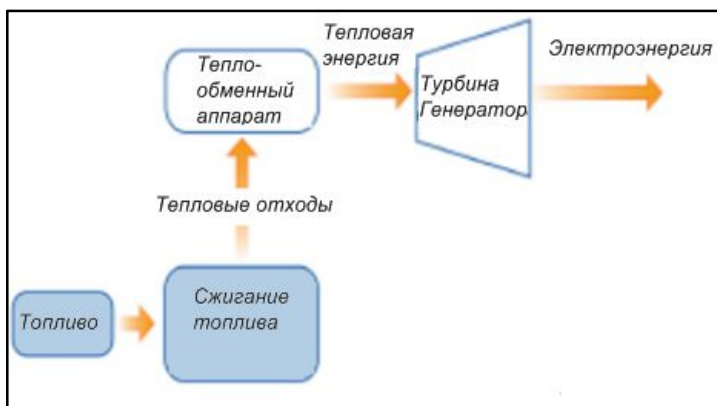


Рис. 15. Схема использования тепловых отходов для производства электроэнергии (нижний цикл)

Наиболее распространенный вариант комбинированной выработки осуществляется по так называемому верхнему циклу, когда топливо первоначально используется в тепловом двигателе для производства механической или электрической энергии, а затем сбросная теплота основного оборудования утилизируется для производства тепловой энергии. Например, газовая турбина или поршневой двигатель производит электроэнергию за счет сжигания топлива, и затем утилизационная установка собирает полезную тепловую энергию сбросных потоков и потоков систем охлаждения. Аналогично, паровые турбины генерируют электрическую энергию, используя пар высокого давления, идущий из котлоагрегатов, после чего отработавший пар более низкого давления используется для технологических целей или целей теплоснабжения.

Тепловые отходы могут использоваться для производства электрической или механической энергии по так называемому нижнему циклу. В таком цикле топливо первоначально используется для обеспечения технологических процессов тепловой энергией, например в печах, а тепловые отходы этого процесса затем используются для производства электричества. Основным преимуществом таких систем является то, что в них используется тепло от существующих процессов, которое в любом случае имело бы место или было бы выброшено в окружающую среду, для

производства электрической энергии, вместо того, чтобы затрачивать дополнительное топливо на эти нужды.

### **5.1. Возможности использования тепловых отходов для производства электроэнергии**

Промышленные предприятия предоставляют наиболее широкие возможности применения тепловых отходов для производства электроэнергии.

Приблизительно одна треть тепловой энергии, потребляемой в промышленности, выбрасывается в виде тепловых потерь в атмосферу или в системах охлаждения. Эти потери являются следствием несовершенства и невозможности использования и утилизации в существующем процессе всех тепловых потоков. Значительную часть из них составляют тепловые отходы, которые, однако, являются непригодными для использования или рассеиваются в виде излучения. Их утилизация на современном уровне технологий не является целесообразной ни с практической, ни с экономической точек зрения.

Эффективность производства электрической энергии из тепловых отходов в значительной степени зависит от температуры сбросного тепла. В общем, экономическая целесообразность этого процесса достигается только при использовании высоко- и среднетемпературных отходов. Новые технологии, такие как органический цикл Ренкина, позволяют снизить этот предел, и дальнейшие разработки альтернативных циклов делают экономически оправданным производство электрической энергии даже из низкотемпературных тепловых отходов.

На уровне проектирования, для экономического обоснования целесообразности производства электроэнергии из тепловых отходов, кроме температурного уровня сбросного тепла должны быть приняты во внимание и следующие факторы:

- являются тепловые отходы газами или это жидкие отходы;
- какова доступность отходов – постоянные, циклические или периодические;
- каков коэффициент использования тепловых отходов, достаточное ли количество часов в году производятся отходы для



покрытия затраты на амортизацию систем производства электроэнергии.

- с постоянной ли температурой производятся тепловые отходы;
- каков расход потоков, меняется ли он во времени;
- тепловые отходы имеют избыточное или пониженное давления, постоянно ли оно;
- каков состав потоков тепловых отходов;
- загрязнены ли потоки тепловых отходов, будут ли они корродировать или разрушать утилизационное оборудование.

Ответы на этих вопросы дадут возможность определить конструктивные особенности утилизационной системы и ее экономическую обоснованность. Значительная часть высокотемпературных источников проста для утилизации и использования в рамках существующих технологий. Другие источники необходимо обязательно очищать перед использованием. Процесс очистки обычно обходится дорого, и удаление загрязняющих веществ часто сопровождается снижением температуры отходов. Некоторые источники тепла трудно использовать из-за конфигурации оборудования или особенностей его эксплуатации.

## **5.2. Применяемые технологии**

Паровой цикл Ренкина (SRC) - наиболее распространенный способ производства электроэнергии из тепловых отходов – вовлекает в использование теплоту отходов для производства в котле-утилизаторе пара, который затем направляется в паровую турбину. Паровая турбина – одна из наиболее старых и универсальных технологий производства энергии. Система «котел-утилизатор – паровая турбина» работает на основе термодинамического цикла Ренкина, представленного на рис. 16. [5]

В паровом цикле Ренкина рабочее вещество – вода – сначала сжимается в насосе, затем направляется в котел-утилизатор. Вода с повышенным давлением испаряется за счет теплоты горячих отходов, образующийся пар расширяется в турбине с понижением температуры и давления, при этом производится механическая

энергия, которая передается на электрический генератор. Пар низкого давления после турбины охлаждается в конденсаторе, в котором поддерживается давление, близкое к вакууму, в результате чего пар конденсируется. Образующийся конденсат перекачивается насосом в котел-утилизатор и цикл замыкается.

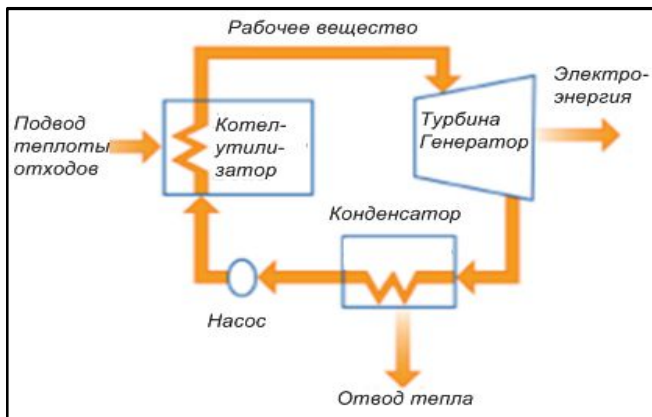


Рис. 16. Цикл теплового двигателя (Ренкина)

Органический цикл Ренкина (ORC) использует другие рабочие вещества, эффективность этого цикла выше, а температура тепловых отходов ниже. Тепловые двигатели на основе цикла ORC используют в качестве рабочего вещества органические жидкости, температура кипения которых ниже, давление при испарении выше, и выше молекулярная масса и массовый расход по сравнению с водой. Все эти факторы и позволяют получить более высокие КПД по сравнению с паровым циклом Ренкина. Системы на базе ORC обычно используются для производства электроэнергии на геотермальных электростанциях и, реже, в системах утилизации теплоты компрессоров [4].

В цикле ORC источник тепла в замкнутой цепи нагревает диатермическое масло до высокой температуры, как правило, около  $300^{\circ}\text{C}$ ; в модуле ORC извлечения тепла из масла проходит в закрытом контуре. В ORC оно испаряется из рабочей жидкости в подходящей системе теплообменника (подогреватель и

испаритель); органический пар производя механическую энергию расширяется в турбине и далее, с помощью генераторов, преобразуется в электрическую энергию; пар затем охлаждается в замкнутом контуре и конденсируется в жидкость, вода нагревается до 80 - 90<sup>0</sup>С и используется для целей теплоснабжения и т.д.; сконденсированные органические жидкости поступают в регенератор и цикл замыкается. Схема цикла представлена на рис. 17.

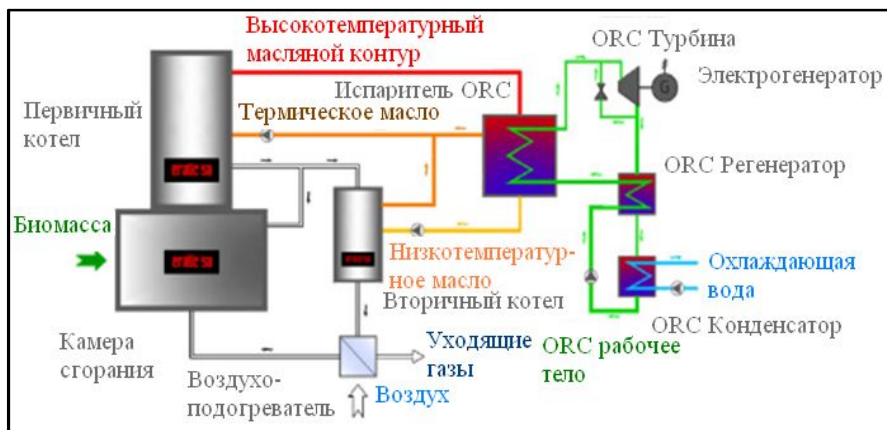


Рис. 17 - Схема органического цикла Ренкина

Цикл Калины является разновидностью цикла Ренкина, в качестве рабочего вещества в нем используется водоаммиачная смесь, что позволяет повысить эффективность извлечения энергии из тепловых отходов. Диапазон рабочих температур данного цикла позволяет использовать в нем тепловые отходы с температурами от 90 до 540<sup>0</sup>С, а эффективность его на 15-20% выше, чем эффективность органического цикла Ренкина при работе на таком же температурном уровне. Циклы Калины становится все более популярным зарубежом в системах, где горячие среды имеют температуру чаще всего ниже 150<sup>0</sup>С.

Простейшая схема энергоустановки на базе цикла Калины (рис. 18) содержит подогреватель раствора (экономайзер) 1, в котором водоаммиачная смесь нагревается до точки кипения, и десорбер 2, где происходит кипение (сначала при более низкой температуре

кипит аммиак, а по мере снижения концентрации аммиака в растворе температура кипения повышается). После сепаратора 3 образовавшийся пар подается на турбину 4, являющуюся приводом электрогенератора 5. Слабый (с меньшей концентрацией аммиака) раствор из сепаратора 3 через дроссельный клапан 6 поступает на смешение с отработавшим паром на выходе из турбины 4. Далее после конденсации в абсорбере 7 крепкий раствор питательным насосом 8 вновь подается в подогреватель 1.

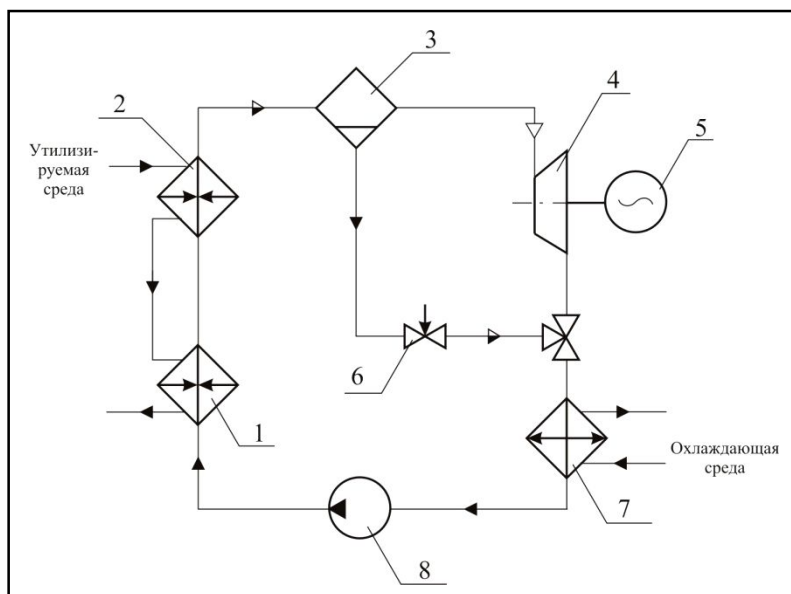


Рис. 18. Принципиальная схема силовой установки с водоаммиачным рабочим веществом

Описанные выше три разновидности цикла аналогичны друг другу. Однако каждый из них имеет свои особенности, определяющие область его применения:

- Применение парового цикла наиболее характерно для промышленности и экономически оправдано в случае, когда температура источника тепловых отходов превышает  $430^{\circ}\text{C}$ .

- При более низких температурах тепловых отходов применяются цикл ORC и Калины. Они работают на более низких температурах, чем паровой цикл, и более эффективны в умеренном диапазоне температур.

- Системы на базе цикла Калины имеют самые высокие показатели теоретических КПД. Но из-за их сложности, они становятся привлекательными только для крупных систем производства энергии, в несколько мегаватт и более.

- ORC системы экономически оправданы для небольших (менее мегаватта) систем, и подходят для использования в конденсаторах с воздушным охлаждением, что позволяет использовать их например, на компрессорных станциях, где есть проблемы с доступом к воде.

Кроме цикла Ренкина, на уровне исследования и разработки имеется ряд других современных технологий, позволяющих производить электроэнергию из тепловых отходов, которые смогут обеспечить дополнительные преимущества такого процесса преобразования в будущем. Такие технологии включают термоэлектрические, пьезоэлектрические, термо-фотоэлектрические устройства. Некоторые из них прошли уже тестирование прототипов в автомобильной промышленности и находятся в стадии разработки для промышленных систем рекуперации тепла.

### **Термоэлектрический способ производства электроэнергии**

К термоэлектрическим материалам относят твердые полупроводники, позволяющие генерировать электричество при условии наличия разности температур. В основе работы таких систем лежит эффект Зеебека, который заключается в том что, между двумя полупроводниками, один из которых является теплоисточником, а второй - теплоотводом возникает напряжение (рис. 19). И наоборот, т. е. материалы также могут быть использованы для охлаждения или нагревания при пропускании тока через цепь, состоящую из разнородных полупроводников.

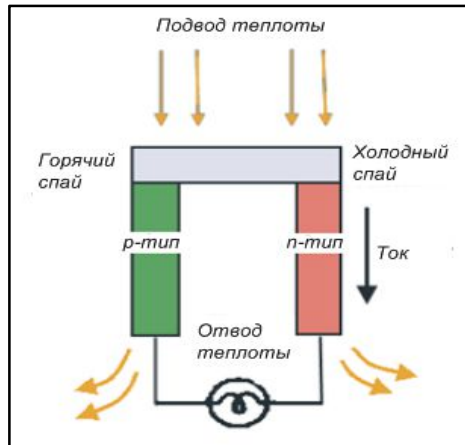


Рис. 19 – Схема термоэлектрического блока

Термоэлектрические технологии существуют уже достаточно давно (термоэлектрический эффект был открыт еще в 1821 году), но их использование ограничено низкой эффективностью и высокими затратами. Большинство генерирующих систем, основанных на этом методе, имеют КПД 2-5% и в основном используются для питания оборудования космических кораблей, или в отдаленных районах [11]. Тем не менее, современные разработки в области нанотехнологий позволяют получить материалы, с помощью которых возможно достичь эффективности 15% и выше.

### **Пьезоэлектрический способ**

Пьезоэлектрический способ производства энергии является еще одним вариантом преобразования низкотемпературных тепловых отходов ( $100-150^{\circ}\text{C}$ ) в электроэнергию. Пьезоэлектрические устройства преобразуют механическую энергию в виде внешних колебаний в электрическую. Пьезоэлектрическая тонкопленочная мембрана может использовать колебания при расширении газа для создания выходного напряжения. Проведенные исследования выявили некоторые технические проблемы, связанные с использованием пьезотехнологий:

- низкая эффективность: всего около 1%; сложность заключается в получении высокочастотных колебаний; для существующих

устройств частота составляет 100 Гц, в то время как желательно иметь частоту около 1000 Гц;

- высокое внутреннее сопротивление;
- сложные динамические процессы колебаний в жидкостях в камере;
- требования долговечности и надежности;
- высокая стоимость.

В то время как коэффициент преобразования энергии в пьезоэлектрических устройствах очень низкий, имеется возможность получения КПД порядка 10% при использовании каскадных систем.

### **Термоэлектронные устройства**

Термоэлектронные устройства работают аналогично термоэлектрическим, однако в то время как в основе термоэлектрического эффекта лежит эффект Зеебека, действие термоэлектронных устройств основано на явлении вырывания электронов из металла при высокой температуре. В этих системах разность температур приводит в действие поток электронов, движущихся в вакууме от металла к поверхности оксида металла. Одним из ключевых недостатком этих систем является то, что область их применения ограничена температурой выше 1000<sup>0</sup>С. Тем не менее, дальнейшие доработки и исследования позволяют использовать их при температуре около 100 - 300<sup>0</sup>С.

### **Термофотоэлектрический генератор**

Термофотоэлектрический генератор может быть использован для преобразования излучения в электроэнергию. Системы на его основе включают в себя теплоисточник, излучатель, фильтр излучения, фотоэлемент (аналогично, как в солнечных батареях). При нагреве излучателя, он испускает электромагнитные волны. Фотоэлемент преобразует это излучение в электричество. Фильтр используется для того, чтобы пропускать ту длину волн, которая наиболее эффективна для работы фотоэлемента, отражая остальное излучение обратно на эмиттер. Такие системы предлагают совершенно новые методы утилизации тепловых отходов. Несколько прототипов таких систем было создано для

использования в небольших горелках и газовых турбинах вертолетов.

### 5.3. Применение детандер-генераторных агрегатов для утилизации ВЭР

Одним из способов дополнительной выработки электрической энергии на крупных промышленных и энергетических объектах является использование детандер-генераторных установок. При поступлении природного газа из магистрального трубопровода в систему промышленного узла осуществляется его распределение и понижение давления на газораспределительной станции. Применение детандер-генераторных агрегатов (ДГА) вместо обычного дросселирования позволяет получать электроэнергию за счет использования избыточного давления природного газа [10].

Условием применения детандер-генераторных установок для использования энергии сжатого природного газа является необходимость нагрева газа на входе в детандер. Газ, расширяясь в детандере, охлаждается. Перепад температуры на турбодетандере при номинальном значении степени понижения давления в нем, равного 3-4, составит 70-80<sup>0</sup>С. В реальных условиях работы газорегулирующего пункта температура газа, подаваемого на узел редукции, меняется в течение года от - 5 до +5<sup>0</sup>С. Таким образом, в различных условиях эксплуатации детандер-генераторной установки необходим различный уровень нагрева природного газа, обеспечивающий при использовании детандер-генераторной установки температуру газа на выходе около 0<sup>0</sup>С.

Процесс дросселирования на станции понижения давления близок к адиабатному, после дросселирования энтальпия потока остается такой же, какой она была на входе потока газа на станцию понижения давления.

При снижении давления газа с применением ДГА возможны несколько различных вариантов организации процесса.

Процесс расширения *без подогрева* газа перед детандером. После такого расширения энтальпия и температура газа после детандера будут значительно ниже, чем после дросселирования. Поэтому необходим дополнительный подвод энергии для подогрева газа.





При определении энергетической эффективности необходимо рассматривать и совершенство ДГА как отдельного устройства для производства электрической энергии, так и степень использования ВЭР при организации подогрева газа в ДГА. Чем выше доля ВЭР, тем выше эффективность.

Доля вырабатываемой ДГА энергии, которая может быть полезно использована, тем выше, чем больше температура газа на входе в теплообменник его подогрева и температура низкопотенциального источника и может достигать 70-80%.

#### **5.4.Области применения систем производства электроэнергии из тепловых отходов**

Применение систем производства электрической энергии из тепловых отходов экономически оправдано в основном для утилизации сбросного тепла отработавших потоков с температурой выше 260<sup>0</sup>С. К промышленным процессам, в результате которых образуются такие отходы, относят обжиг (цемента, извести, оксида алюминия и нефтяного кокс), плавление металлов, варку стекла, нагрев поток нефтепродуктов, термическое окисление, и экзотермические процессы синтеза.

1. Производство металлов. Производство первичных металлов сопровождается рядом процессов, тепловые отходы которых могут быть полезно использованы. Например, на сталелитейных заводах имеются различные возможности утилизации сбросного тепла. На крупных заводах можно утилизировать теплоту коксовых, доменных печей для производства чугуна и кислородно-конвертерных печей для производства стали. Возможно также утилизация теплоты электрических дуговых печей. В литейных цехах есть множество источников тепловых отходов, таких как отработанные газы плавильной печи, ковша предварительного нагрева, основного продукта, заливки, дробеструйной обработки, охлаждения литья, термической обработки и закалки.

2. Производство неметаллических минеральных продуктов. В этом секторе также имеется ряд возможностей для использования технологий выработки электроэнергии из тепловых отходов. Прокаливание в барабанных печах представляет собой высокотемпературный процесс, который имеет место при

изготовлении цемента, гипса, глинозема, кальцинированной соды, извести и каолиновой глины. В стекольной промышленности широко используются плавильные печи, печи обжига и закалки, работающие на высоких температурах.

3. Нефтепереработка. Основными технологическими процессами нефтепереработки являются дистилляции (фракционирование), термический крекинг, каталитическая обработка. Эти процессы потребляют значительное количество энергии, в некоторых имеют место экзотермические реакции, в результате которых выделяется тепло. Современные нефтеперерабатывающие заводы представляют собой тесно связанную систему, в которой отходы одного производства используются в другом процессе. Но, несмотря на это, потенциал использования вторичного тепла на таких предприятиях все еще достаточно велик для использования его в целях производства электроэнергии. Примером являются уходящие газы кальцинаторов нефтяного кокса. Нефтяной кокс нагревают до  $1300^{\circ}\text{C}$  и газы, покидающие кальцинаторы, имеют, как правило, температуру от 480 до  $540^{\circ}\text{C}$ .

4. Химическая промышленность. Имеется ряд отраслей промышленности, таких как нефтехимическая, отрасль промышленных газов, щелочей и хлора, сырой нефти и промежуточных продуктов (например, этилена, пропилена, и бензола/толуола/ксилола), пластмасс, синтетических каучуков, синтетических органических волокон, и сельскохозяйственных химикатов (удобрения и пестициды), в которых образуются высокотемпературные отходы, которые могут быть использованы для производства электроэнергии.

5. Металлоконструкции. Процессы генерации отходящего тепла включают подогрев металла, его термообработку, очистку, сушку, и нагрев в печах.

6. Компрессорные станции, газораспределительные станции.

7. Энергетические системы сбора свалочного газа. На свалках, использующих поршневые двигатели внутреннего сгорания или турбины для производства электроэнергии, с помощью цикла ORC можно производить дополнительно электроэнергию, используя отработанные газы. Либо установки на базе цикла ORC можно

устанавливать для производства энергии из отходов сжигания мусора.

8. Добыча нефти и газа. В производстве и добыче нефти и газа имеется ряд горючих энергоресурсов, которые могут быть использованы для производства энергии.

Суммарные затраты на установку систем утилизации тепловых отходов включают затраты на утилизационное оборудование (котел или парогенератор), оборудование для производства электроэнергии (для парового, ORC или цикла Калины), вспомогательное оборудование. Кроме этого, необходимо учитывать затраты, связанные с выполнением проектных, строительных, пуско-наладочных, монтажных работ. Затраты на системы производства энергии на базе циклов Ренкина аналогичны, и зависят более от размеров проекта и сложности создания единой системы, чем от типа цикла. Особенностью их является отсутствие затрат на топливо для производства энергии.

## **6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЮЧИХ ОТХОДОВ**

Для характеристики горючих отходов используют следующие характеристики и методы:

1. Высшая и низшая теплота сгорания.
2. Экспресс-анализ, т.е. определение их влажности, содержания золы и горючих компонентов, способствующих образованию летучих веществ и связанного углерода.
3. Элементарный анализ, т.е. анализ горючих фракций и пепла.

К основным свойствам горючих отходов относятся:

- форма и размер, физическая и насыпная плотность, горючесть и тление твердых отходов;
- давление пара, температура кипения, плотность, вязкость, температура самовоспламенения, коррозионная активность, токсичность и выход газа или разложение во время предварительного нагрева, возможное самоокисление, полимеризация или другие неконтролируемые параметры, экзотермичность и опасность воздействия отходов;
- плотность, предел взрывоопасности, токсичность и коррозионная активность отходящих газов.

Теплота сгорания позволяет определить, являются ли отходы горючими, трудногорючими или негорючими. Кроме того, она необходима для определения мощности и составления баланса печи, определения требований к воздуху, участвующему в процессе горения, принятия решения о целесообразности утилизации теплоты, предварительного подогрева воздуха или совместного использования с другими отходами.

Экспресс-анализ определяет количество влаги, необходимое для удаления до начала процесса горения и требуемые размеры системы золоудаления. Влажные отходы, такие как мусор, отходы переработки сточных вод и водных растворов, сжигаются только после удаления, по крайней мере, избыточной влаги, содержащейся в них. Следовательно, быстрая сушка должна осуществляться с использованием соответствующих способов, таких как воздействие тепловым излучением или контакт с легко воспламеняющимися отходами.

Из химического анализа горючих можно оценить количество и состав дымового газа при заданном коэффициенте избытка воздуха. В первом приближении, содержащаяся в веществе сера, хлор и азот в процессе горения преобразуются в  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{NO}$ . Их концентрация определяет, требуется ли осуществлять мокрую очистку дымовых газов. При медленном охлаждении дымовых газов в присутствии каталитической летучей золы,  $\text{SO}_2$  дополнительно окисляется до  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$  переходит в  $\text{Cl}_2$ . Часть  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  и  $\text{HCl}$  удаляется при поглощении летучей золой. Содержание  $\text{NO}$  снижается при поэтапном сжигании, т.е. в условиях, когда сгорание осуществляется в две ступени: первая – в восстановительных условиях, вторая – при относительно низких температурах.

Химический анализ пепла дает информацию о характере его размягчения и плавления, и, соответственно, о его липкости и воздействии на огнеупорные материалы. Натриевые и калиевые соединения снижают температуру плавления, особенно в присутствии персульфатов, ванадатов и боратов. Присутствие летучих элементов, таких как ртуть, таллий, кадмий, мышьяк, сурьма и т.д. делает неприемлемым сжигание в традиционных устройствах, если не предусмотрены способы очистки воздуха от загрязнения.

Некоторые свойства особенно важны при выборе и определении способов хранения, обработки и подачи топлива, а также положений техники безопасности. Кроме этого, необходимо знать периодичность и время поставок горючих отходов, вид используемого для хранения оборудования.

Существует несколько способов утилизации горючих отходов для получения энергии:

1. Прямое сжигание. Это процесс контролируемого процесса горения для получения тепла с коэффициентом избытка воздуха больше 1. В данном случае осуществляется термохимическая конверсия, сопровождающаяся высвобождением химической энергии топлива, тепла, содержащегося в нем при ограниченном влагосодержании и высокой мощности нагрева.

2. Пиролиз – процесс химического разложения, при котором материал нагревается за счет теплоты внешнего источника без или с ограниченным доступом воздуха, в результате чего образуется смесь твердых, жидких и газообразных топлив, часть которых может быть использована в качестве источника нагрева для пиролиза.

3. Газификация – процесс термического разложения, происходящий аналогично процессу горения, но коэффициент избытка воздуха меньше 1. Отходы преобразуются в газ, содержащий преимущественно  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ .

4. Плазменный процесс – отходы нагреваются до высоких температур (от  $3000^{\circ}\text{C}$  до  $10000^{\circ}\text{C}$ ) с помощью энергии плазменной дуги, выделяющейся при прохождении электрического разряда в инертной среде. В результате, органические отходы преобразуют в газ, богатый водородом, а неорганические отходы - в инертный стеклообразный остаток.

5. Анаэробное сбраживание – это процесс микробиологического разложения отходов в отсутствие воздуха. Обрабатываемые органические отходы характеризуются высоким содержанием влаги; в результате разложения образуется газ, преимущественно метан и  $\text{CO}_2$ .

6. Получение свалочного газа – газа (в основном на мусорных свалках), образующегося в результате разложения с помощью бактерий, присутствующих в отходах и почвенных пластах свалок. В отличие от предыдущего случая, микробиологическое

разложение является неконтролируемым процессом, хотя частично имеет место и анаэробное сбраживание.

Каждый из этих методов переработки требует разное количество исходных материалов, а  $\text{CO}_2$  образуется в различных количествах и с разной эффективностью.

По возможности использования различаются утилизируемые и не утилизируемые отходы. Для первых существует технология переработки и вовлечения в хозяйственный оборот, для вторых в настоящее время практически полностью отсутствует.

На современном этапе открывается всё больше возможностей существенно сократить количество не утилизируемых отходов, которые имеют сложный химический состав, и, как правило, их переработка в полезные продукты или весьма затруднительна на современном этапе, или экономически нецелесообразна. К таким возможностям можно отнести использование пиролиза промышленных отходов.

### **Пиролиз промышленных отходов**

Существует два различных типа пиролиза токсичных промышленных отходов.

#### **1) Окислительный пиролиз.**

Окислительный пиролиз – процесс термического разложения промышленных отходов при их частичном сжигании или непосредственном контакте с продуктами сгорания топлива. Данный метод применим для обезвреживания многих отходов, в том числе «неудобных» для сжигания или газификации вязких, пастообразных отходов, влажных осадков, пластмасс, шламов с большим содержанием золы, загрязненных мазутом, маслами и другими соединениями земли, сильно пылящих отходов. Кроме этого, окислительному пиролизу могут подвергаться отходы, содержащие металлы и их соли, которые плавятся и возгорают при нормальных температурах сжигания, отработанные шины, кабели в измельченном состоянии, автомобильный скрап и др.[4].

Метод окислительного пиролиза является перспективным направлением ликвидации твердых промышленных отходов и сточных вод.

#### **2) Сухой пиролиз.**

Этот метод термической обработки отходов обеспечивает их высокоэффективное обезвреживание и использование в качестве топлива и химического сырья, что способствует созданию малоотходных и безотходных технологий и рациональному использованию природных ресурсов.

Сухой пиролиз – процесс термического разложения без доступа кислорода. В результате образуется пиролизный газ с высокой теплотой сгорания, жидкий продукт и твердый углеродистый остаток.

В зависимости от температуры, при которой протекает пиролиз, различается [4]:

1. Низкотемпературный пиролиз или полукоксование ( $450 - 550^{\circ}\text{C}$ ). Данному виду пиролиза характерны максимальный выход жидких и твердых (полукокс) остатков и минимальный выход пиролизного газа с максимальной теплотой сгорания. Метод подходит для получения первичной смолы – ценного жидкого топлива, и для переработки некондиционного каучука в мономеры, являющиеся сырьем для вторичного создания каучука. Полукокс можно использовать в качестве энергетического и бытового топлива.

2. Среднетемпературный пиролиз или среднетемпературное коксование (до  $800^{\circ}\text{C}$ ) дает выход большего количества газа с меньшей теплотой сгорания и меньшего количества жидкого остатка и кокса.

3. Высокотемпературный пиролиз или коксование ( $900 - 1050^{\circ}\text{C}$ ). Здесь наблюдается минимальный выход жидких и твердых продуктов и максимальная выработка газа с минимальной теплотой сгорания – высококачественного горючего, пригодного для транспортировок на далекие расстояния.

В результате уменьшается количество смолы и содержание в ней ценных легких фракций.

Метод сухого пиролиза получает все большее распространение и является одним из самых перспективных способов утилизации твердых органических отходов и выделения ценных компонентов из них на современном этапе развития науки и техники.

Существует еще один вид горючих отходов – это отходы одного технологического процесса, которые могут быть использованы в другом процессе в качестве топлива. Примерами таких отходов



являются технологические газы в черной и цветной металлургии, топливо, жидкие и твердые отходы химической и нефтегазовой промышленности, щепы, опилки, стружка, древесной щелок в целлюлозно-бумажной промышленности.

Многие горючие отходы имеют низкую теплоту сгорания и химически агрессивны ко многим материалам, что обуславливает трудность их утилизации. Например, такие проблемы возникают при сжигании высококалорийных, но, в то же время, горючих, взрывоопасных и токсичных отходов (водород, сухие выхлопные газы и т.д.).

Для использования горючих отходов часто необходимо использовать специальное оборудование, но основная область их применения – в технологических процессах.

В сталелитейной промышленности *колошниковые газы* являются наиболее значимыми горючими отходами. В частности, при их сжигании можно покрыть 35 - 45% потребности в тепле металлургических предприятий. Температура газов составляет 175 - 250<sup>0</sup>С, в газах содержится около 23-40% СО, 12-22% СО<sub>2</sub>, 1,5 - 6% Н<sub>2</sub>, остальное - N<sub>2</sub>; его теплотворная способность составляет 4 МДж/м<sup>3</sup>.

Очищенные от пыли колошниковые газы используются в основном в доменных печах, энергетических котлах для нагрева батарей коксовых печей, нагревательных колодцах печей и прокатных станов. Кроме того, их можно использовать в газовых турбинах.

Вторым (после колошниковых газов) наиболее важным источником СО в черной металлургии является *конвертерный газ*. Его теплотворная способность составляет 8,4 – 9,2 МДж/м<sup>3</sup>, температура 1400 – 1600<sup>0</sup>С, этот газ также используется в качестве тепловых отходов.

*Коксовый газ* третий по величине источник горючих отходов в сталелитейной промышленности и черной металлургии. Следует отметить высокий выход этого вида отходов в производстве кокса (около 80% потребления первичной энергии). Энергетический потенциал коксового газа может быть использован для утилизации его как в качестве тепловых, так и горючих отходов.

Основным потребителем коксового газа в виде топлива является производство металлов. Прежде всего, газ используется в

мартеновских печах и нагревательных приборах термообработки металла. При имеющихся достаточно больших объемах, он также используется в нагревателях батареях коксовых печей. В этом случае температура продуктов сгорания на выходе составляет 260-3500<sup>0</sup>С, и 15-20% подведенного тепла выносится с уходящими газами. На некоторых предприятиях, тепло отработанных газов расходуется на получение горячего воздуха для нагрева угольной башни в зимний период.

Газообразные горючие ВЭР (доменный, коксовый газы, водород, сдвух органических веществ в химической промышленности и др.) утилизируются в горелочных устройствах. При сжигании горючих отходов с невысокой теплотой сгорания и содержанием более 50% примесей в виде азота, диоксида углерода, паров воды и др. веществ в горелочных устройствах следует осуществлять рекуперативный нагрев газов, добавление для стабилизации горения высококалорийного газа, полное предварительное смешение топлива с окислителем, предельно возможное укорочение факела.

Низкокалорийные газы сажевых производств сжигают в пакетно-конвективных котлах (ПКК). Котлы имеют предтопок, в котором сажевый газ сжигается в смеси с природным газом (либо мазутом). Воздух, поступающий в горелки, подогревается до 350<sup>0</sup>С. Для сжигания отбросных газов используют специальные горелки, обеспечивающие совместное сжигание отбросного и природного газов.

В качестве примера использования жидких горючих ВЭР можно назвать сжигание черных сульфатных щелоков в целлюлозно-бумажной промышленности. Щелок имеет низкую калорийность, высокое влагосодержание и высокую зольность. Поскольку необходима регенерация химических веществ черного щелока, то его сжигают в специальных содорегенерационных котлах (СРК) при этом одновременно вырабатывается пар с давлением до 4 МПа и температурой до 450<sup>0</sup>С. Конструкция СРК аналогична конструкции энергетического котла, но имеет отличия, связанные со сбором расплавленных щелочных солей, необходимостью очистки от загрязнений поверхностей нагрева в топке котла.

Кора и другие древесные отходы в зависимости от влажности имеют низшую теплоту сгорания 15 – 18,9 МДж/кг. Наряду с органическими веществами такие горючие ВЭР содержат

минеральные вещества, что обуславливает при их сжигании образование золы. При использовании древесных отходов в энергетических котлах их сжигание осуществляется, как правило, в слое. Наиболее распространены котлы, оборудованные предтопками с наклонной неподвижной или горизонтальной подвижной колосниковыми решетками. Для устойчивого горения древесные отходы должны иметь начальную влажность менее 55%, иначе их необходимо подсушивать в барабанной или аэрофонтанной сушилке уходящими из котла газами. Процесс пиролиза древесных отходов может быть осуществлен в пиролизных котлах (рис. 21).

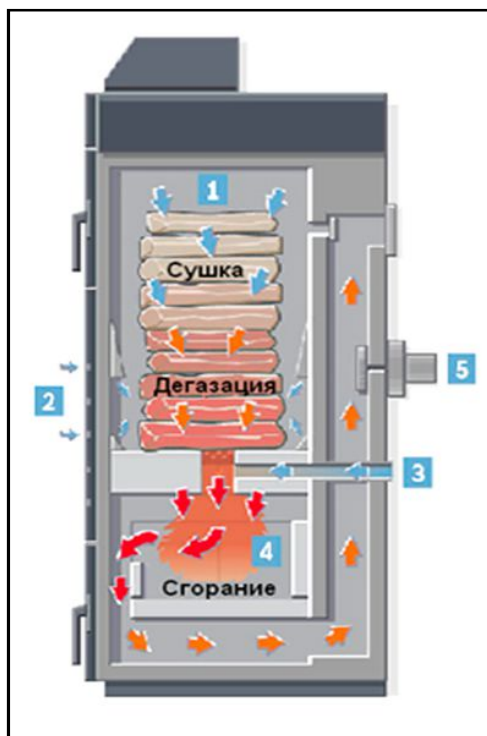


Рис. 21. Схема пиролизного котла. 1 – загрузочная камера; 2 – первичный воздух; 3 – вторичный воздух; 4 – камера сгорания; 5 – вентилятор

Верхняя камера представляет собой топливный бункер. В нее закладываются дрова, и здесь же происходит процесс горения, в результате которого выделяется газ. Благодаря процессу газификации, в топливном бункере происходит предварительное подсушивание дров, а также подогрев воздуха, направляемого в камеру сгорания.

Нижний отсек является камерой сгорания и зольником одновременно. Здесь происходит непосредственно процесс сжигание древесного газа и скапливается отработанный пепел. Между этими двумя камерами находится газифицирующая форсунка.

Этапы работы пиролизного котла:

1. Сушка - в верхней области камеры сгорания после воспламенения дрова высушиваются, остающаяся влажность составляет приблизительно 20 % при  $100^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ .

2. Дегазация - при температурах, начинающихся с  $250^{\circ}\text{C}$  в средней области, дрова начинают разлагаться в подобные газу компоненты - целлюлоза, смолы, и происходит дегазация масел. Начиная с  $500^{\circ}\text{C}$ , связанный твердый углерод превращается в газ. Приблизительно 85 % веществ при сгорании дров превращаются в горючие газы, остальное остается древесным углем.

3. Сгорание - при температуре свыше  $600^{\circ}\text{C}$  горючие газы окисляются и воспламеняются и образуется горячий слой древесного угля. Приблизительно с  $900$  до  $1000^{\circ}\text{C}$  газы насыщаются углеродом и обеспечивают необходимую высокую температуру для разложения древесного угля.

К достоинствам пиролизного котла можно отнести более полное сгорание топлива, экономичность горения, экономия топлива, более высокий уровень КПД; регулируемость процесса горения, до 12 часов с одной закладкой; возможность сжигания крупных отходов.

Процесс горения пиролизных газов легко поддается управлению и регулировке, что позволяет автоматизировать работу такого котла приблизительно в той же степени, что и работу газовых котлов;

Применение данного типа котлов стимулирует отказ от применения не подсушенного топлива, что повышает эффективность хозяйствования;

К недостаткам пиролизного котла можно отнести более высокую цену, по сравнению с традиционными твердотопливными котлами;

зависимость от электроэнергии, что сужает применение данного вида котлов или потребует дополнительных вложений для приобретения генератора на жидком топливе, для поддержания работы котла в отсутствие подачи электроэнергии.

## **7 АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Проекты по утилизации тепловых отходов должны быть экономически оправданы и обоснованы, и, исходя из этого, простой срок окупаемости по экономии топлива в таких системах не должен превышать 8 лет. На срок окупаемости проекта влияют следующие факторы:

- отдаленность потребителя и производителя энергии;
- количество утилизируемого тепла;
- условия работы энергоисточника и потребителя;
- требуемое качество утилизированного тепла.

Экономическая оценка играет важнейшую роль при принятии окончательного решения руководителем и финансирующим институтом о том, будет ли осуществлено инвестирование в энергосберегающий проект или нет. Взаимодействие между энергоменеджерами и теми, кто принимает окончательное решение, играют важную роль. Энерго-менеджер должен учиться говорить на языке управления и уметь представлять проекты с точки зрения их экономической привлекательности для мотивирования ответственных лиц в принятии положительного решения.

### **Анализ рентабельности проекта**

Анализ рентабельности - это метод, используемый для оценки финансовой осуществимости проекта. Анализ затрат жизненного цикла проекта (LCCA) используется для определения прибыльности проекта, так как что он учитывает весь жизненный цикл проекта и временную стоимость денег.

### **Анализ жизненного цикла проекта**

Анализ стоимости жизненного цикла (LCC) учитывает все расходы, начиная от этапа проектирования до этапа утилизации; разделяет полученный экономический эффект от инвестиций;

определяет как абсолютную (NPV), так и относительную (SIR) экономию.

Основные определения, используемые при экономическом анализе:

1. Будущая стоимость (БС, PV) – показывает стоимость проекта в определенный момент в будущем.

$$FV = PV \cdot (1 + i)^n$$

Где n – период реализации проекта.

2. Настоящая стоимость (НС, PV) – показывает стоимость проекта сегодня.

3. Ставка дисконтирования ( $i$ ) – это процентная ставка, используемая для перерасчёта будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости. Ставка дисконтирования включает безрисковую ставку, ставку инфляции и премии за риск.

4. Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV) или чистая приведенная стоимость:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t}$$

Здесь В – прибыль; С – затраты;  $i$  – процентная ставка; t – год реализации проекта.

5. Внутренняя норма доходности (IRR,  $E_{\text{вн}}$ ) – это расчетная ставка процента, при которой полученный доход от проекта равен инвестициям в проекте. Можно сказать, что  $E_{\text{вн}}$  – это ставка дисконтирования, при которой ЧДД = 0.

$$E_{\text{вн}} = E_{\text{вн}} \left( i : \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} = 0 \right)$$

Теоретически, любой проект, при котором внутренняя норма доходности выше, чем капитальные затраты, является прибыльным (и имеет положительный ЧДД или NPV). Компании устанавливают

точки безубыточности – минимальные значения IRR, допустимые компанией для реализации проекта. При точке безубыточности доходы обычно выше, чем затраты компании. Только высокоприбыльные проекты принимаются к выполнению.

6. Срок окупаемости ( $T_{ок}$ , РВР) – период времени, требуемый для того, чтобы доходы, покрыли затраты на инвестиции в установку по утилизации тепловых отходов.

$$T_{ок} = \frac{K}{\mathcal{E}}$$

Где  $K$  – капвложения;  $\mathcal{E}$  – годовой экономический эффект.

Простой срок окупаемости, выраженный в годах, не принимает во внимание будущую стоимость затрат. Его используют для проектов с очень быстрой окупаемостью. Если проект окупиться за год, то нет особой необходимости вычислять будущую стоимость. Для более длительных периодов окупаемости, простой срок окупаемости не отображает реальную картину возврата инвестиций.

7. Индекс прибыльности (SIR,  $\Pi_{и}$ ) - отношение суммы настоящей стоимости за расчетный период при ставке дисконтирования, к величине капитальных вложений.

$$\Pi_{и} = \frac{НС}{K}$$

При  $\Pi_{и} > 1$  проект является прибыльным (экономически обоснованным).

Порядок определения экономической целесообразности внедрения энергетического проекта:

- I. Определение издержек в существующем варианте.
- II. Определение новых издержек (при реализации проекта и после реализации).
- III. Расчет разности издержек в существующем и новом варианте.
- IV. Выбор ставки дисконтирования.
- V. Выбор периода для анализа проекта.
- VI. Оценка остаточной стоимости оборудования в конце его срока службы.

- VII. Расчет текущей стоимости годовой экономии.
  - VIII. Расчет текущей стоимости инвестиций.
  - IX. Расчет чистой приведенной стоимости.
  - X. Определение индекса прибыльности и внутренней нормы доходности.
8. Годовой экономический эффект (Э)

$$\text{Э} = I_6 - I_n + I_{\text{э.б.}} - I_{\text{э.н.}} + I_{\text{др.б.}} - I_{\text{др.н.}}$$

где

$I_6$  - издержки в базовом варианте;

$I_n$  - новые издержки по проекту;

$I_{\text{э.б.}}$  - эксплуатационные затраты и затраты на обслуживание в существующем варианте;

$I_{\text{э.н.}}$  - эксплуатационные затраты и затраты на обслуживание в новом варианте;

$I_{\text{др.б.}}$  - другие расходы в старом варианте;

$I_{\text{др.н.}}$  - другие расходы в новом варианте.

Значения составляющих годового экономического эффекта могут быть отрицательными.

Для нахождения годового экономического эффекта необходимо сначала определить экономию топлива от внедрения утилизационной системы.

## **8 РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

Для технико-экономического обоснования эффективности внедрения утилизационной установки с использованием источников низкопотенциальной энергии предлагается рассмотреть технологию приготовления сублимированного творога с использованием вакуум-аппаратов. При отсасывании сыворотки происходит ее вскипание при понижении давления. Чтобы не допустить нежелательных термических процессов, необходимо постоянно охлаждать вакуум-насосы.

По существующей в цеху сублимированного творога технологии охлаждения вакуум-аппаратов 1-4 осуществляется водопроводной водой, которая, нагреваясь, сбрасывается в канализацию (рис.22а).



В целях энерго и ресурсосбережения и обеспечения цеха горячей водой предлагаются альтернативные технические решения по утилизации теплоты сбрасываемой воды, при этом организуется система оборотного водоснабжения. Для нормальной работы вакуум-насосов необходимо обеспечить охлаждение оборотной воды с 30 до 10 °С. Предлагаются следующие варианты:

- а) Действующая схема.
- б) Предлагаемые схемы утилизации.

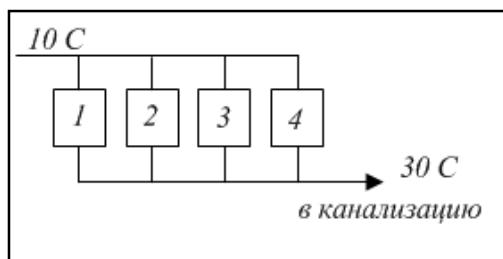


Рис. 22а. Действующая схема

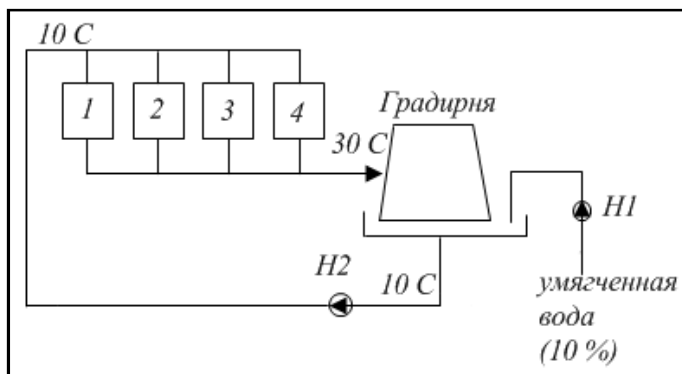


Рис. 22б. Схема утилизации теплоты. Вариант 1

Вариант 1 (рис. 22б). Организация закрытого контура охлаждения на основе малогабаритной вентиляторной градирни. При этом происходит унос воды и необходима подача подпиточной воды, составляющая около 10% от расхода охлаждающей воды. Недостаток такой схемы - эффективность работы градирни зависит

от температуры и влажности охлаждающего воздуха, т.е от параметров окружающей среды.

Вариант 2 (рис. 22в). Организация закрытого контура двухступенчатого охлаждения на основе пластинчатого теплообменника «вода-вода» (ТО1) и теплообменника «вода-воздух» (ТО2). При этом происходит частичная утилизация теплоты оборотной воды (первая ступень), она охлаждается с 30 до 15 °С. При этом поступающая водопроводная вода нагревается до 27 °С, далее она поступает в бойлер для догрева до температуры ее потребления.

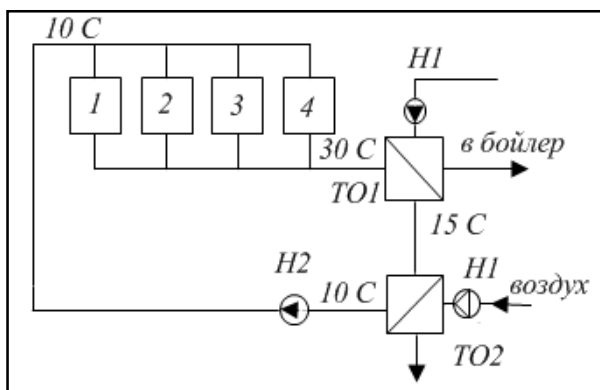


Рис. 22в. Схема утилизации теплоты. Вариант 2

Вариант 3 (рис. 22г). Организация закрытого контура двухступенчатого охлаждения на основе пластинчатого теплообменника «вода-вода» и теплового насоса «вода-вода» с использованием утилизированной теплоты (утилизация происходит в обеих ступенях) для горячего водоснабжения цеха. В такой системе происходит двухступенчатое охлаждение оборотной воды:

- с 30 до 19 °С в теплообменнике в первой ступени, при этом водопроводная вода нагревается с 10 до 26 °С,
- с 19 до 10 °С в ТНУ во второй ступени, водопроводная вода догревается до 55 °С. При такой температуре вода может напрямую подаваться в систему горячего водоснабжения.

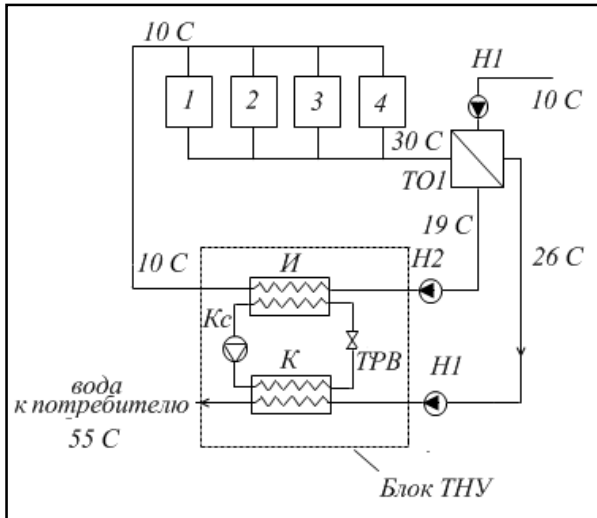


Рис. 22г. Схема утилизации теплоты. Вариант 3. И – испаритель; Кс – компрессор; К – конденсатор; ТРВ – терморегулирующий вентиль.

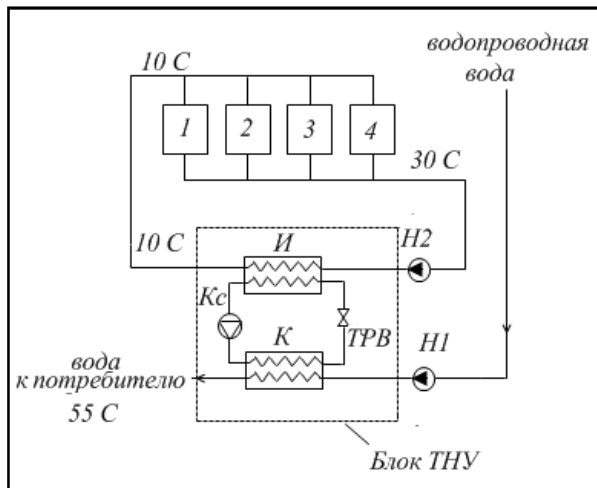


Рис. 22д. Схема утилизации теплоты. Вариант 4. И – испаритель; Кс – компрессор; К – конденсатор; ТРВ – терморегулирующий вентиль.

Вариант 4. (рис. 22д). Организация закрытого контура охлаждения на основе теплового насоса «вода-вода» с использованием утилизированной теплоты для горячего водоснабжения цеха при температуре горячей воды 55<sup>0</sup>С.

### 8.1. Сравнение вариантов схемы охлаждения вакуум-насосов и утилизации теплоты

Исходными данными для выполнения работы являются:

- Расход охлаждаемой воды,  $G$ ;
- Мощность насосов  $H1$  и  $H2$ ;
- Число часов работы установки в году,  $\tau$ , ч/год;
- Удельные капвложения в градирню,  $K_{уд.1}$ ;
- Удельные капвложения в теплообменные аппараты,  $K_{уд.2}$ ;
- Удельные капвложения в теплонасосную установку,  $K_{уд.3}$ ;
- Количество обслуживающего персонала,  $L$ ;
- Часовая тарифная ставка  $C_p$ , руб./чел.;
- Марка используемого в теплонасосной установке хладагента.

Количество теплоты, отводимое от охлаждающей воды, во всех вариантах определяется по формуле:

$$Q_{ут} = c_p \cdot G \cdot \Delta t, \text{ кВт.} \quad (8.1)$$

Здесь  $G$  – расход охлаждаемой воды, кг/с; где  $c_p$  - теплоемкость воды (при н.у.  $c_p = 4,19$  кДж/кг <sup>0</sup>С);  $\Delta t$  - разница температур воды на входе и выходе из утилизационной установки, <sup>0</sup>С.

Необходимо обратить внимание, что в варианте с использованием градирни теплота не утилизируется, а сбрасывается в окружающую среду. В вариантах схем 3, 4 утилизация теплоты осуществляется в двух ступенях. Каждая ступень в расчете рассматривается отдельно.

$\Delta G$  – количество сэкономленной воды, м<sup>3</sup>/год.

В варианте 1 происходит унос воды и необходима подача подпиточной воды, составляющая около 10% от расхода охлаждающей воды, поэтому в первом варианте составит:

$$\Delta G = 0,9 \cdot G \cdot \tau.$$

В остальных вариантах количество утилизируемой воды системы охлаждения составляет 100%, т.е.  $\Delta G = G \cdot \tau$ .

Расход топлива, необходимого для производства утилизируемого количества теплоты  $Q_{ВЭР}$  при производстве его в замещаемой установке. Как было отмечено выше, в варианте с применением градирни утилизация теплоты не осуществляется, а в последующих вариантах охлаждения воды происходит в две ступени, каждую из которых необходимо рассмотреть отдельно.

Для теплообменного аппарата:

$$B_{\text{тепл}} = Q_{\text{т.о.}} \cdot \tau \cdot b_{\text{т}}, \text{ кг у.т/год}, \quad (8.2)$$

где  $\tau$  - расчетное время работы схемы в год теплообменного аппарата, ч/год;  $Q_{\text{т.о.}}$  - вырабатываемая теплообменным аппаратом тепловая энергия,  $b_{\text{т}}=0,157$  т у.т/Гкал- коэффициент пересчета тепловой энергии на условное топливо.

Для теплового насоса:

$$B_{\text{тепл}} = Q_{\text{тн}} \cdot \tau \cdot b_{\text{т}}, \text{ кг у.т/год}, \quad (8.3)$$

Где  $B_{\text{тепл.}}$  - экономия тепловой энергии за год в пересчете на кг у.т,  $Q_{\text{тн}}$  - вырабатываемая ТН тепловая энергия, кВт, равная

$$Q_{\text{тн}} = N \cdot \varphi_{\text{д}}, \text{ кВт} \quad (8.4)$$

Для вариантов утилизации теплоты в двух ступенях  $B_{\text{тепл.}}$  для каждой ступени суммируются.

Расход условного топлива на выработку электроэнергии для привода используемого в утилизационной установке электрооборудования:

$$B_{\text{эл}} = N_{\Sigma} \cdot \tau \cdot b_{\text{э}}, \text{ кг у.т/год}, \quad (8.5)$$

где  $N_{\Sigma}$  - суммарная мощность циркуляционных насосов и компрессоров, кВт,  $b_{\text{э}}=0,3$  кг у.т/кВт·ч - коэффициент пересчета электроэнергии на условное топливо. Мощность насосов указана на

схеме и в задании. Мощность компрессора определяется через коэффициент преобразования теплового насоса.

$$N = \frac{Q_{\text{ВЭР}}}{\varphi_{\text{д}} - 1} \quad (8.6)$$

$Q_{\text{ВЭР}}$  в данном случае определяется аналогично  $Q_{\text{УТ}}$ , с учетом необходимой степени охлаждения воды.

Коэффициент преобразования идеального цикла определяется следующим соотношением:

$$\varphi_{\text{Т}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (8.7)$$

Значение действительного коэффициента при отсутствии более точных данных принимается равным  $\varphi_{\text{д}} = 0,5 \cdot \varphi_{\text{Т}}$ .

$T_1$  - температура конденсации хладагента (К), равная  $t_1 = t_{\text{ВЫХ}} + \Delta t_{\text{к}}$ , °С;  $T_2$  - температура кипения хладагента (К), равная  $t_2 = t_{\text{Н}} - \Delta t_{\text{и}}$ , °С.

$t_{\text{ВЫХ}}$  - температура нагретой в тепловом насосе воды (55°С);

$t_{\text{Н}}$  - температура охлаждаемой среды на выходе из испарителя (10°С);

$\Delta t_{\text{к}}$  - температурный перепад в конденсаторе, обусловленный наличием разности температур конденсации хладагента и температуры нагреваемой среды, принимается равным 5°С;

$\Delta t_{\text{и}}$  - температурный перепад в испарителе, обусловленный наличием разности температур кипения хладагента и температуры охлаждаемой среды, принимается равным 7°С.

$t_{\text{Н}}$  - температура охлаждаемой воды на выходе из испарителя.

Количество теплоты, получаемое водопроводной водой от хладагента в конденсаторе:

Экономия условного топлива составит:

$$\Delta B = B_{\text{тепл}} - B_{\text{эл}}, \text{ кг у.т./год.} \quad (8.8)$$

Рассчитанные значения сводятся в таблицу 1.

Таблица 1

## Сравнение различных вариантов утилизации тепла

№ варианта	1	2	3	4
$Q_{ут}$ , кВт				
$\Delta G$ , м <sup>3</sup> /год				
1 ступень				
$\Delta t$ , °С				
$Q_{т.о}$ , кВт				
2 ступень				
$\Delta t$ , °С				
$Q_{ВЭР}^1$ , кВт				
Коэффициент				
$N_{\Sigma}$ , кВт				
$Q_{т.н}$ , кВт				
$B_{тепл.}$ , кг у.т./год				
$B_{эл.}$ , кг у.т./год				
$\Delta B$ , кг у.т./год				

Показатель экономической эффективности - срок окупаемости предложенной схемы:

$$T_{ок} = \frac{K}{D} = \frac{K}{\Delta B \cdot C_{у.т.} + \Delta G \cdot C_{в} - A}, \text{ лет}, \quad (8.9)$$

где  $K$  - первоначальные капитальные вложения в разрабатываемую утилизационную систему, руб.

для варианта 1:  $K = K_{уд.1} \cdot Q_{ут}$ ;

для варианта 2:  $K = K_{уд.2} \cdot Q_{ут}$ ;

для варианта 3:  $K = K_{уд.2} \cdot Q_{т.о} + K_{уд.3} \cdot Q_{тн}$ ;

для варианта 4:  $K = K_{уд.3} \cdot Q_{тн}$ .

$D$  - планируемый доход от ввода в эксплуатацию данной системы, руб.;  $A$  - амортизационные отчисления, принимаются в размере 10% от стоимости оборудования  $K$ , руб.;  $C_{у.т.}$  - стоимость

<sup>1</sup> Определяется только для 3 и 4 вариантов

условного топлива;  $\Delta G$ , м<sup>3</sup>/год - количество сэкономленной воды с учетом уноса;  $C_{\text{в}}$  = тариф на воду, руб./м<sup>3</sup>.

Результаты расчета свести в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение экономической эффективности различных способов утилизации тепла

№ варианта	1	2	3	4
$\Delta B$ , кг у т/год				
$\Delta G$ , м <sup>3</sup> /год				
$D$ , руб/год				
$K$ , руб				
$T_{\text{ок}}$ , лет				

Данный расчет не учитывает реальных тарифов на тепло и электроэнергию, поэтому получаемые результаты сроков окупаемости занижены. Несмотря на это, полученные значения можно использовать в качестве оценки предложенных вариантов.

Результатом расчета является выбор оптимальной системы утилизации теплоты, основанный на технико-экономическом анализе эффективности внедрения каждого варианта системы.

С точки зрения экономической эффективности, варианты 1 и 2 являются наиболее привлекательными, однако отсутствие утилизации теплоты (экономия достигается только за счет создания замкнутого контура водоснабжения системы охлаждения насосов) в первом варианте и зависимость эффективной (и соответствующей требованиям охлаждения вакуум-насосов) работы от параметров окружающей среды в варианте 2 делают эти варианты непривлекательными с точки зрения создания энергоэффективной утилизационной системы. Поэтому эти варианты не представляют интерес для дальнейшего рассмотрения.

Сравнение 3 и 4-го вариантов указывают на целесообразность применения двухступенчатого охлаждения воды с применением теплонасосной установки, как более экономичного.



Таким образом, к установке принимается схема утилизации теплоты низкопотенциальных тепловых ВЭР, представленная в варианте 3.

### Пример расчета

В варианте 1 утилизации тепла не происходит. В качестве исходных данных принимается система с расходом охлаждающей воды равным  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , работающая 5500 часов в году.

Количество теплоты, которую необходимо отвести от охлаждающей воды определяется по формуле:

$$Q_{\text{ут}} = \frac{4,19 \cdot 5 \cdot (30 - 10) \cdot 1000}{3600} = 116,4 \text{ кВт},$$

Аналогичная формула используется для нахождения утилизируемой теплоты ВЭР (в вариантах 2, 3, 4), при этом  $\Delta t$  принимает различные значения. В вариантах схем 2, 3 утилизация происходит в две ступени. Каждая ступень в расчете рассматривается отдельно.

$\Delta G$  - количество сэкономленной воды,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

В варианте 1 происходит унос воды и необходима подача подпиточной воды, составляющая около 10% от расхода охлаждающей воды.  $\Delta G$  для варианта 1 составит:

$$\Delta G = 0,9 \cdot 5 \cdot 5500 = 24750 \text{ м}^3/\text{год}.$$

В остальных вариантах уноса воды не происходит.

Определим  $Q_{\text{т.о}}$  для вариантов, в которых утилизация теплоты осуществляется в теплообменном аппарате первой ступени.

Для варианта 2:

$$Q_{\text{т.о}} = 4,19 \cdot 1,39 \cdot 15 = 87,3 \text{ кВт}.$$

Аналогично определяется  $Q_{\text{т.о}}$  и для варианта 3.

$Q_{\text{ВЭР}}$  для второй ступени определяется аналогично соотношению (8.1) с учетом степени охлаждения воды в данной ступени.

Для варианта 3:

$$Q_{\text{ВЭР}} = 4,19 \cdot 1,39 \cdot 9 = 52,4 \text{ кВт.}$$

Для варианта 4:

$$Q_{\text{ВЭР}} = 4,19 \cdot 1,39 \cdot 20 = 116,4 \text{ кВт.}$$

Определяем коэффициент преобразования теплового насоса, используемого для утилизации теплоты в вариантах 3 и 4.

Температуры

$$t_1 = t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{к}} = 55 + 5 = 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_2 = t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{н}} = 10 - 7 = 3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\varphi_{\text{T}} = \frac{333}{333 - 276} = 5,8$$

$$\varphi_{\text{д}} = 0,5 \cdot \varphi_{\text{T}} = 2,9.$$

Определим суммарную электрическую мощность, затрачиваемую в каждом варианте. В вариантах 3 и 4 кроме насосов потребителями являются компрессора тепловых насосов. Определим мощность привода теплонасосной установки в варианте 3.

$$N_{\text{ТН}} = \frac{52,4}{2,9 - 1} = 27,6 \text{ кВт ;}$$

Тогда суммарная потребляемая мощность системы в варианте 3 (при заданных мощностях насосов равных 0,25 и 0,2 кВт) составит:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{ТН}} + N_1 + N_1 + N_2 = 27,6 + 0,25 + 0,25 + 0,2 = 28,3 \text{ кВт.}$$

Определим тепловой поток на конденсаторе теплонасосной установки ( $Q_{\text{т.н.}}$ ).

Для варианта 3:

$$Q_{т.н} = 27,6 \cdot 2,9 = 80, \text{ кВт.}$$

Аналогично определяется мощность привода компрессора, суммарная мощность и тепловой поток в конденсаторе для варианта 4.

Определим расход топлива для производства тепловой энергии в замещаемой теплообменным аппаратом или тепловым насосом котельной установке.

Для варианта 3:

$$B_{\text{менл.}} = 1,163 \cdot (64 + 80) \cdot 5500 \cdot 0,157 = 144612, \text{ кг у т/год.}$$

Расход топлива для производства электрической энергии на привод циркуляционных насосов и компрессоров.

Для варианта 3:

$$B_{\text{эл.}} = 28,3 \cdot 5500 \cdot 0,3 = 46695, \text{ кг у т/год.}$$

Экономия топлива от внедрения теплоутилизационной установки:

Для варианта 3:

$$\Delta B = 144612 - 46695 = 97917, \text{ кг у т/год.}$$

Результаты расчет сводим в таблицу 1.

Рассчитываем срок окупаемости. Результаты расчета сводим в таблицу 2.

## 8.2. Расчет теоретического цикла теплового насоса

*Тепловой насос* представляет собой установку, при помощи которой осуществляется перенос энергии в форме теплоты от источника с более низкой температурой к источнику более высокого температурного уровня, необходимого для теплоснабжения.

Независимо от типа теплового насоса и типа привода компрессора на единицу затраченного исходного топлива потребитель получает по крайней мере в 1,1–2,3 раза больше тепла, чем при прямом сжигании топлива. Такая высокая эффективность производства тепла достигается тем, что тепловой насос вовлекает в полезное использование низкопотенциальное тепло естественного происхождения (тепло грунта, природных водоемов, грунтовых вод) и техногенного происхождения (промышленные стоки, очистные сооружения, вентиляция и т.д.) с температурой от +3 до +40°C, т.е. такое тепло, которое не может быть напрямую использовано для теплоснабжения.

Теплонасосный и холодильный циклы, осуществляющие перенос теплоты от источника низкого потенциала к источнику более высокого потенциала за счет потребления первичной энергии, являются обратными по отношению к циклу теплового двигателя, причем для повышения температурного потенциала рабочего тела можно применять энергию любого вида: механическую, тепловую и др.

Качество теплонасосного обратного цикла оценивается коэффициентом преобразования  $\phi$  (отопительный коэффициент), равным отношению теплоты  $Q_1$ , переданной горячему источнику, к подведенной извне энергии  $N$ .

В компрессор поступает сухой насыщенный пар, который в процессе изэнтропного сжатия перегревается. Поступив в теплообменник потребителя, он отдает теплоту и при давлении  $p_1$  изобарно охлаждается до температуры конденсации, а затем конденсируется при постоянной температуре. Расширение рабочего тела в дроссельном клапане при понижении давления от  $p_1$  до  $p_2$  сопровождается не только понижением его температуры, но и частичным испарением жидкости (рабочего пара) с образованием смеси (жидкость + пар), которая, поступив в испаритель, отбирает теплоту от источника низкого потенциала. Для уменьшения доли пара в рабочем теле на выходе из дросселя перед ним устанавливается промежуточный теплообменник – переохладитель (ПО), в котором жидкость на входе в дроссель несколько переохлаждается, отдавая теплоту воде, поступающей в

конденсатор, осуществляя тем самым ее промежуточный подогрев.

Схема одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса с переохладителем представлена на рис. 23.

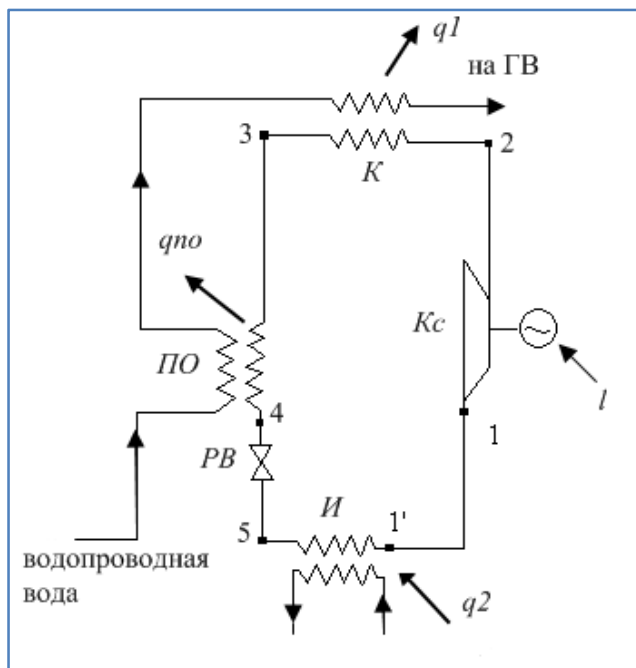


Рис. 23. Схема одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса с переохладителем

Точка 1' характеризует параметры рабочего вещества на выходе из испарителя, а точка 1 – на всасывании в компрессор. Разница температур в точках объясняется перегревом холодных паров в трубопроводе при движении рабочего вещества по всасывающей линии. Величина этого перегрева зависит от температуры кипения хладагента, и в тепловых насосах принимается 5-8 °С. Процесс 1-2 – сжатие паров в компрессоре; 2-3 – охлаждение и конденсация в конденсаторе; 3-4 – переохлаждение рабочего вещества; 4-5 – дросселирование.

В расчете принимается, что в переохладителе температура хладагента снижается на  $20^{\circ}\text{C}$ .

Для выбранного варианта (3 или 4) выполняется расчет цикла теплового насоса для уточнения температуры нагреваемой в конденсаторе воды. Рабочим телом в тепловом насосе являются хладагенты (марка используемого хладагента указана в задании).

Для расчета теплового насоса и подбора основного оборудования к нему необходимо построить цикл в  $\lg P-h$  ( $\lg P-i$ ) диаграмме, определить параметры хладагента в различных точках цикла. Полученные данные представляются в виде таблицы 3.

Таблица 3

Параметры хладагента в характерных точках цикла

	1'	1	2	3	4	5
$t, ^{\circ}\text{C}$						
$P, \text{МПа}$						
$i, \text{кДж/кг}$						
$v, \text{м}^3/\text{кг}$						

Внутренняя работа цикла:

$$l_k = h_2 - h_1, \text{кДж/кг.} \quad (8.10)$$

Так как в процессе дросселирования работа не производится, поэтому работа цикла равна работе компрессора.

Удельное количество низкопотенциальной теплоты, подведенное от охлаждаемой среды к хладагенту в испарителе:

$$q_0 = h_{1'} - h_5, \text{кДж/кг.} \quad (8.11)$$

Удельное количество теплоты, отдаваемое конденсатором в систему отопления помещения:

$$q_k = h_2 - h_3, \text{кДж/кг.} \quad (8.12)$$

Удельная тепловая нагрузка охладителя

$$q_{\text{по}} = h_3 - h_4, \text{ кДж/кг.} \quad (8.13)$$

Теоретический массовый расход хладагента

$$G_T = \frac{Q_{\text{ВЭР}}}{q_0}, \text{ кг/с.} \quad (8.14)$$

$Q_{\text{ВЭР}}$  – тепловой поток в испарителе теплового насоса, рассчитанный в предыдущем пункте.

Объемная теоретическая производительность компрессора

$$V = v \cdot G_T, \text{ м}^3/\text{с} \quad (8.15)$$

### Пример расчета

Построим цикл в  $\lg P$ - $i$  диаграмме для хладагента R134a (см. приложение). Температура испарения  $t_2$  и конденсации  $t_1$  хладагента рассчитаны в пункте 8.1. Параметры хладагента в конкретных точках цикла заносим в таблицу 3.

Таблица 3

Параметры хладагента в характерных точках

	1'	1	2	3	4	5
$t, ^\circ\text{C}$	3	10	72	60	40	3
$P, \text{ МПа}$	0,32	0,32	1,8	1,8	1,8	0,32
$i, \text{ кДж/кг}$	400	405	442	288	255	255
$v, \text{ м}^3/\text{кг}$		0,07				

Внутренняя работа компрессора

$$l_k = h_2 - h_1 = 37 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная тепловая нагрузка испарителя

$$q_0 = h_1' - h_5 = 145 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная тепловая нагрузка конденсатора

$$q_k = h_2 - h_3 = 154 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная тепловая нагрузка охладителя

$$q_{\text{по}} = h_3 - h_4 = 33 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретический массовый расход хладагента

$$G_T = \frac{Q_{\text{ВЭР}}}{q_0} = \frac{52,4}{145} = 0,36, \text{ кг/с.}$$

Объемная теоретическая производительность компрессора составит

$$V_T = v \cdot G_T = 0,07 \cdot 0,36 = 0,025, \text{ м}^3/\text{с.}$$

### 8.3. Расчёт действительного цикла

Действительный цикл парового компрессорного теплового насоса отличается от теоретического наличием объёмных и энергетических потерь как в компрессоре, так и вне его. Энергетические потери увеличивают затраты мощности по сравнению с теоретической. Объёмные потери возникают в основном в компрессоре.

Все виды объёмных потерь в практических условиях учитываются коэффициентом подачи, величина которого равна

$$\lambda = \frac{V_T}{V_d} = \lambda_i \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{\text{пл}} \quad (8.16)$$

Где  $V_T$  и  $V_d$  – теоретическая и действительная объёмные производительности компрессора,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$\lambda_i = \lambda_c \cdot \lambda_{\text{др}}$  – индикаторный коэффициент всасывания;  $\lambda_{\text{др}}$  – коэффициент дросселирования, равный 0,95;  $\lambda_c$  – объёмный коэффициент



$$\lambda_c = 1 - c_0 \cdot \left[ \left( \frac{P_K}{P_0} \right)^{1,2} - 1 \right] \quad (8.17)$$

$c_0$  – относительная величина объёма вредного пространства, составляющая 2-6%.

$\lambda_w$  -коэффициент подогрева, определяемый соотношением абсолютных температур кипения и конденсации рабочего вещества

$$\lambda_w = \frac{T_0}{T_K} \quad (8.18)$$

$\lambda_{пл}$  – коэффициент плотности, равный 0,98.

Теоретическая объемная производительность компрессора с учетом потерь в нем составит:

$$V_d = \frac{V_T}{\lambda}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (8.19)$$

Действительный расход хладагента

$$G_d = \frac{V_T}{v}, \text{ кг/с}. \quad (8.20)$$

### Пример расчета

Объёмный коэффициент

$$\lambda_c = 1 - 0,03 \cdot \left[ \left( \frac{1,8}{0,32} \right)^{1,2} - 1 \right] = 0,903.$$

Индикаторный коэффициент всасывания

$$\lambda_i = 0,903 \cdot 0,95 = 0,858$$

Коэффициент подогрева

$$\lambda_w = \frac{T_0}{T_k} = \frac{3 + 273}{60 + 273} = 0,829.$$

Коэффициентом подачи

$$\lambda = 0,858 \cdot 0,829 \cdot 0,98 = 0,697.$$

Объемная производительность компрессора

$$V_d = \frac{0,025}{0,697} = 0,036, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Действительный расход хладагента

$$G_d = \frac{0,036}{0,07} = 0,52, \text{ кг/с}.$$

#### 8.4. Определение потребляемой мощности компрессора

Потребляемая мощность компрессора определяется из выражения

$$N = \frac{N_T}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_s} \quad (8.21)$$

где  $\eta_i$  - индикаторный КПД компрессора,  $\eta_i = \lambda_w + b \cdot t_0$ , где  $b = 0,0025$ .

$\eta_m$  - механический КПД компрессора, значение которого зависит от отношения давлений  $P_k/P_0$ : при  $P_k/P_0 = 2 \div 7$ ,  $\eta_m = 0,9$ . При более высоких значениях  $P_k/P_0$ ,  $\eta_m = 0,8$ .

$\eta_s$  - КПД электродвигателя, для электродвигателей малых компрессоров  $\eta_s = 0,85 \div 0,9$ .

$$N_T = G_d \cdot (h_2 - h_1).$$

### Пример расчета

Индикаторный КПД компрессора

$$\eta_i = \lambda_w + b \cdot t_0 = 0,829 + 0,0025 \cdot 3 = 0,84.$$

Потребляемая мощность компрессора составит

$$N = \frac{37 \cdot 0,52}{0,84 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 28,2 \text{ кВт}.$$

При  $\frac{p_k}{p_0} = \frac{1,8}{0,32} \approx 5$ ,  $\eta_M = 0,9$ .

## 8.5. Расчет действительных нагрузок на теплообменное оборудование температуры нагрева и охлаждения воды

Действительная нагрузка на испаритель

$$Q_{\text{и}} = G_d \cdot q_0 \quad (8.22)$$

Действительная нагрузка на переоохладитель

$$Q_{\text{по}} = G_d \cdot q_{\text{по}} \quad (8.23)$$

Действительная нагрузка на конденсатор

$$Q_{\text{к}} = G_d \cdot q_{\text{к}} \quad (8.24)$$

Суммарная теплопроизводительность теплового насоса

$$Q_{\text{тн}}^{\text{д}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{по}} \quad (8.25)$$

Температура охлаждаемой воды на выходе из испарителя при заданном расходе составит

$$t_{н2} = t_{н1} - \frac{Q}{c_p \cdot G} \quad (8.26)$$

Где  $t_{н1}$  – температура воды на входе в испаритель.  
Температура воды на выходе из конденсатора

$$t_{вых} = \frac{Q_{тн}^д}{c_p \cdot G_2} + t_{вх} \quad (8.27)$$

где  $G_2$  – расход подогреваемой воды, проходящей через конденсатор, определяется из уравнения теплового баланса теплообменного аппарата первой ступени:

$$G_2 \cdot c_p \cdot (t_{в1} - t_{в2}) = G \cdot c_p \cdot (t_{н1} - t_{н2}),$$

где  $t_{в1}$  и  $t_{в2}$  – температура водопроводной воды на входе и выходе из теплообменного аппарата (по схеме соответственно  $26^0\text{C}$  и  $10^0\text{C}$ );  $t_{н1}$  и  $t_{н2}$  – температура охлаждаемой воды на входе и выходе из теплообменного аппарата - испарителя (по схеме соответственно  $30^0\text{C}$  и  $19^0\text{C}$ ).

$$G_2 = \frac{11 \cdot G}{16} = 0,867 \cdot G.$$

Коэффициент преобразования теплового насоса

$$\varphi = \frac{Q_{тн}^д}{N} \quad (8.28)$$

### Пример расчета

Действительная нагрузка на испаритель

$$Q_{и} = 0,52 \cdot 145 = 75,4 \text{ кВт.}$$

Действительная нагрузка на переоохладитель

$$Q_{\text{по}} = 0,52 \cdot 33 = 17,2 \text{ кВт.}$$

Действительная нагрузка на конденсатор

$$Q_{\text{к}} = 0,52 \cdot 154 = 80,1, \text{ кВт.}$$

Суммарная теплопроизводительность теплового насоса

$$Q_{\text{тн}}^{\text{д}} = 80,1 + 17,2 = 97,3 \text{ кВт.}$$

Температура воды на выходе из испарителя

$$t_{\text{н2}} = 19 - \frac{75,4}{4,19 \cdot 1,39} = 6 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Расход водопроводной воды:

$$G_2 = 3,43 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,95 \text{ кг/с.}$$

Температура воды, на выходе из конденсатора

$$t_{\text{вых}} = \frac{97,3}{4,19 \cdot 0,95} + 26 = 52 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Коэффициент преобразования теплового насоса

$$\varphi = \frac{97,3}{28,2} = 3,45.$$

Расчет цикла теплового насоса показывает, что выбранная теплоутилизационная установка позволяет охлаждать воду до  $6^{\circ}\text{C}$ , в то время как по условиям задания вода в систему охлаждения должна поступать с температурой  $10^{\circ}\text{C}$ . Однако наличие

теплообмена с окружающей средой позволит повысить температуру воды в процессе ее движения по трубопроводу и, в систему охлаждения она будет подаваться с требуемой температурой.

### **8.6. Расчет экономической эффективности внедрения теплоутилизационной схемы**

Результатом данного расчета является простой срок окупаемости, учитывающий существующие тарифы на электрическую и тепловую энергию, а также стоимость теплоутилизационного оборудования.

Разрабатываемая установка позволяет не только снижать температуру воды, которая затем используется для охлаждения технологического оборудования, но и возвращать сбросное тепло вторичных энергоресурсов в систему теплоснабжения объекта (вырабатывать тепло для поддержания требуемого микроклимата и т.д.).

За базу для сравнения выбран, как наиболее экономичный из существующих вариант выработки тепла на котельной, а при охлаждении технологического оборудования широко распространенный вариант охлаждения водопроводной водой как наиболее простой и наименее капиталоемкий.

Основными статьями затрат являются капиталовложения, эксплуатационные расходы на оплату за тепловую и электрическую энергию и рассчитанные на их основе приведенные затраты.

Исходные данные для расчета экономических показателей представляются в виде таблице4. Основные показатели взяты из предыдущих расчетов. Суммарная теплопроизводительность включает тепловую нагрузку на теплообменник «вода-вода», действительную нагрузку на конденсатор и переохладитель:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{тн}}^{\text{д}} + Q_{\text{т.о.}}$$

Установленная мощность электрооборудования – потребляемую мощность компрессора, рассчитанную в п. 8.5 и суммарную мощность привода насосов:

$$N_{\Sigma} = N + \sum N_{\text{н}},$$

$\sum N_{\text{н}}$  - суммарная мощность привода насосов, определяется по схеме для варианта 3.

Общие капиталовложения в мероприятие по внедрению утилизационной установки определяются по формуле:

$$K_{\Sigma} = K + K_{\text{вспом}} + K_{\text{тепломех}} + K_{\text{смр}} + K_{\text{пнр}} + K_{\text{проект}} \quad (8.29)$$

$K$  – стоимость основного оборудования, млн. руб..

Стоимость основного оборудования может быть определено как:

$$K = K_{\text{уд.2}} \cdot Q_{\text{т.о.}} + K_{\text{уд.3}} \cdot Q_{\text{тн}}^{\text{Д}}$$

$K_{\text{вспом}}$  – стоимость вспомогательного оборудования (электротехнических устройств) принимается при отсутствии данных 10 – 15 % от стоимости основного оборудования;  $K_{\text{вспом}} = 0,15 \cdot K$ .

$K_{\text{тепломех}}$  – стоимость тепломеханической части (подвод сетевой воды, трубопроводы технической воды и т.д.) 15–20 % от стоимости основного оборудования;  $K_{\text{тепломех}} = 0,15 \cdot K$ .

$K_{\text{смр}}$  – стоимость строительно-монтажных работ 15 – 30% от стоимости основного оборудования;  $K_{\text{смр}} = 0,2 \cdot K$

$K_{\text{пнр}}$  – стоимость пуско-наладочных работ 3–5% от стоимости основного оборудования;  $K_{\text{пнр}} = 0,05 \cdot K$ .

$K_{\text{проектн}}$  – стоимость проектно-изыскательских работ 5–10% от стоимости строительно-монтажных работ;  $K_{\text{проектн.}} = 0,1 \cdot K_{\text{смр}}$

$$K_{\Sigma} = K + 0,15 \cdot K + 0,15 \cdot K + 0,2 \cdot K + 0,05 \cdot K + 0,1 \cdot K_{\text{смр}} \quad (8.30)$$

Промежуточные результаты расчета экономического эффекта от внедрения установки в течение года сводятся в таблицу 5.

Таблица 5

## Исходные данные для расчета

Наименование показателей	Обозначение	Базовый вариант	Новый вариант
Общие капвложения	К, млн. руб		
Теплопроизводительность	$Q_{\Sigma}$ , кВт		
Удельный расход воды системы охлаждения	$G$ , м <sup>3</sup> /ч		
Годовая нагрузка аппарата	$\tau$ , ч/год		
Количество обслуживающего персонала	$L$ , чел.		
Часовая тарифная ставка оператора 3-его разряда	$C_p$ , руб./чел.час		
Установленная мощность электрооборудования	$N_{\Sigma}$ , кВт		
Тариф на электроэнергию	$C_{\Sigma}$ , руб./кВт·ч		1500
Тариф на тепловую энергию от котельной	$C_t$ , руб./кВт·ч	250	
Тариф на 1 м <sup>3</sup> водопроводной воды	$C_v$ , руб./м <sup>3</sup>	4800	
Тариф на 1 м <sup>3</sup> сточных вод	$C_{ст.в}$ , руб./м <sup>3</sup>	4800	
Норма амортизационных отчислений	$a_i$ , ед./год		0,1
Норма отчислений на техническое обслуживание и ремонт и технический ремонт	$r_i$ , ед./год		0,05
Норма эффективности капвложений	$E_n$ , ед./год	0,15	0,15
Затраты топлива при производстве энергии: - тепловой, - электрической	$b_t$ , т.у.т/Гкал $b_э$ , кг.у.т/кВт·ч	0,157	0,3



Таблица 5

## Расчет экономической эффективности

Наименование показателей	Формула расчета	Единицы измерения	Баз. вариант	Нов. вариант
Годовая выработка (потребление) тепловой энергии	$Q_{\Gamma} = \frac{Q_{\Sigma} \cdot 3,6 \cdot \tau}{1000}$	ГДж/год		
Затраты труда на обслуживание	$3_{об} = L \cdot \tau$	чел-ч/год		
Затраты на оплату труда обслуживающего персонала	$3_0 = \frac{3_{\Gamma} \cdot C_p}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч		
Амортизационные отчисления на оборудование	$A = \sum \frac{K_{\Sigma} \cdot a_i}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	
Затраты на ТР и ТО	$P = \sum \frac{K_{\Sigma} \cdot r_i}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./Вт·ч	-	
Оплата за потребленную электроэнергию	$3_э = \frac{N_{\Sigma} \cdot \tau \cdot \Pi_э}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	
Оплата за потребленную тепловую энергию	$3_{\Gamma} = \Pi_{\Gamma}$	руб./кВт·ч		-
Затраты на оплату подпиточной воды и ее сброс в канализацию	$3_в = \frac{G \cdot (\Pi_в + \Pi_{ст.в})}{Q_{\Sigma}}$	руб./кВт·ч		-
Прямые эксплуатационные затраты: -базовый вариант	$I_б = 3_0 + 3_{об} + 3_в$	руб./кВт·ч		
	$I_н = 3_0 + 3_э + A + P$	руб./кВт·ч		

- новый вариант				
Удельные капиталовложения	$K_{уд} = \frac{K_{\Sigma}}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	
Приведенные затраты	$\Pi = И + E_n \cdot K_{уд}$	руб./кВт·ч		
Экономический эффект по приведенным затратам: - удельный - годовой	$\mathcal{E}_{уд} = \Pi_б - \Pi_n$	руб. кВт·ч	-	
	$\mathcal{E}_r = (\Pi_б - \Pi_n) \cdot Q_{\Sigma} \cdot \tau$	руб./год	-	
Срок окупаемости	$T_{ок} = \frac{K_{\Sigma}}{\mathcal{E}_r}$	лет	-	

### Пример расчета

Стоимость оборудования

$$K = 9000000 \cdot 64 + 4900000 \cdot 97,3 = 534,37 \text{ млн.руб.}$$

Общие капвложения  $K = 878\,406\,534$  руб.

Суммарная теплопроизводительность

$$Q_{\Sigma} = 64 + 97,3 = 161,1 \text{ кВт.}$$

Установленная мощность электрооборудования

$$N_{\Sigma} = 28,2 + 0,25 + 0,2 = 28,9, \text{ кВт.}$$

Результаты расчета представлены в таблице 5

Таблица 5

## Расчет экономической эффективности

Наименование показателей	Формула расчета	Единицы измерения	Баз. вариант	Нов. вариант
Годовая выработка (потребление) тепловой энергии	$Q_{\Gamma} = \frac{Q_{\Sigma} \cdot 3,6 \cdot \tau}{1000}$	ГДж/год	3185	3185
Затраты труда на обслуживание	$Z_{об} = L \cdot \tau$	чел-ч/год	5500	5500
Затраты на оплату труда обслуживающего персонала	$Z_o = \frac{Z_{\Gamma} \cdot C_p}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	5,59	5,59
Амортизационные отчисления на оборудование	$A = \sum \frac{K_{\Sigma} \cdot a_i}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	99,3
Затраты на ТР и ТО	$P = \sum \frac{K_{\Sigma} \cdot r_i}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	49,6
Оплата за потребленную электроэнергию	$Z_э = \frac{N_{\Sigma} \cdot \tau \cdot \Pi_э}{Q_{\Sigma} \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	270,3
Оплата за потребленную тепловую энергию	$Z_{\Gamma} = \Pi_{\Gamma}$	руб./кВт·ч	250	-

Продолжение таблицы 5

Затраты на оплату подпиточной воды и ее сброс в канализацию	$Z_B = \frac{G \cdot (C_B + C_{ст.в})}{Q_\Sigma}$	руб./кВт·ч	427,9	-
Прямые эксплуатационные затраты: -базовый вариант -новый вариант	$I_6 = Z_0 + Z_{об} + Z_B$ $I_H = Z_0 + Z_3 + A + P$	руб./кВт·ч руб./кВт·ч	683,5	424,8
Удельные капиталовложения	$K_{уд} = \frac{K_\Sigma}{Q_\Sigma \cdot \tau}$	руб./кВт·ч	-	992,6
Приведенные затраты	$\Pi = I + E_H \cdot K_{уд}$		683,5	573,7
Экономический эффект по приведенным затратам: - удельный -годовой	$\mathcal{E}_{уд} = \Pi_6 - \Pi_H$ $\mathcal{E}_Г = (\Pi_6 - \Pi_H) \cdot Q_\Sigma \cdot \tau$		109,8 97167510	
Срок окупаемости	$T_{ок} = \frac{K_\Sigma}{\mathcal{E}_Г}$		9	

### 8.7. Обоснование инвестиций в реализуемый проект

Поскольку инвестиции представляют собой долгосрочное вложение экономических ресурсов с целью создания и получения чистых выгод в будущем, для оценки инвестиций необходимо все требуемые вложения и отдачу по проектам оценить с учетом временной ценности денег. Т.е. с учетом того обстоятельства, что сумма денег, находящаяся в распоряжении в настоящее время, обладает большей ценностью, чем такая же сумма в будущем.

Поэтому при оценке эффективности проекта целесообразно использовать концепцию дисконтирования потока реальных денег.

Для принятия решения о финансировании энергосберегающего мероприятия рассчитывается чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности ( $E_{\text{вн}}$ ) и индекс прибыльности ( $\Pi_{\text{и}}$ ).

Настоящая стоимость денег НС определяется:

$$НС = Э \cdot (1+E)^{-t}, \text{ млн.руб.}$$

Здесь  $\mathcal{E}$  – годовая экономия от внедрения мероприятия, млн. руб.;

$E$  – ставка дисконтирования;

$t$  – период, в течении которого осуществляются инвестиции и эксплуатация оборудования.

Ставка дисконтирования принимается на уровне 10%, (что соответствует рекомендациям большинства работавших в РБ международных финансовых организаций).

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) характеризует интегральный эффект от реализации проекта и определяется как величина, полученная дисконтированием разницы между всеми годовыми оттоками и притоками реальных денег, накапливаемых в течение горизонта расчета проекта:

$$\text{ЧДД}_0 = -K$$

$$\text{ЧДД}_1 = \text{НС}_1 + \text{ЧДД}_0$$

Результаты расчета заносятся в таблицу 6.

Индекс прибыльности в данном случае равен:

$$\Pi_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^t \text{НС}_{(10\%)}}{K_{\Sigma}}$$

Мероприятие считается экономически эффективным при  $\Pi_{\text{и}} > 1$ .

Внутренняя норма доходности ( $E_{\text{вн}}$ ) - это расчетная ставка процента, при которой полученный доход от проекта равен инвестициям в проекте, максимальный процент, который может быть оплачен для привлечения инвестиций.

В случае, когда внутренняя норма доходности больше ставки дисконтирования (10%), энергосберегающее мероприятие, которое предлагается в данном проекте эффективно.

Для нахождения внутренней нормы доходности графическим методом при помощи мастера диаграмм Microsoft Excel строится график при значениях чистого дисконтированного дохода в том году, при котором ЧДД имеет положительное значение при  $E = 0,1$  и ЧДД имеет отрицательное значение при  $E = 0,12$ .

Динамический срок окупаемости  $T_d$  определяет фактический период времени, в течение которого инвестиционные вложения покрываются суммарными доходами от внедрения энергосберегающего мероприятия, т.е. фактический возврат кредита или других заемных средств.

Более простым способом определения динамического срока окупаемости  $T_d$  на практике является графический метод. На горизонтальной оси  $X$  откладываются равные промежутки времени, соответствующие годам расчетного периода (горизонт расчета)  $T$ . По вертикальной оси  $Y$  откладываются величины чистого дисконтированного дохода (ЧДД при  $E=10\%$ ) в соответствующем году. Воспользовавшись мастером диаграмм Microsoft Excel, строят график. Точка пересечения кривой с осью  $X$  определяет динамический срок окупаемости.

### Пример расчета

Поскольку простой срок окупаемости получился достаточно высоким (9 лет), то для определения динамического срока окупаемости период осуществления инвестиций принимаем 25 лет. Результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6

## Расчет чистого дисконтированного дохода

Год	Кап. вложения, К, млн.руб.	Экономия, Э, млн.руб.	Настоящая стоимость, НС (для 10%), млн.руб.	Настоящая стоимость, НС (для 12%), млн.руб.	ЧДД, E=0,1, млн.руб.	ЧДД, E=0,12, млн.руб.
0	878,41	0,00	0,00	0,00	-878,41	-878,41
1		97,16	88,33	86,75	-790,08	-791,65
2		97,16	80,30	77,46	-709,78	-714,19
3		97,16	73,00	69,16	-636,77	-645,04
4		97,16	66,36	61,75	-570,41	-583,29
5		97,16	60,33	55,13	-510,08	-528,15
6		97,16	54,85	49,23	-455,23	-478,93
7		97,16	49,86	43,95	-405,37	-434,97
8		97,16	45,33	39,24	-360,05	-395,73
9		97,16	41,21	35,04	-318,84	-360,69
10		97,16	37,46	31,28	-281,38	-329,41
11		97,16	34,06	27,93	-247,32	-301,48
12		97,16	30,96	24,94	-216,36	-276,54
13		97,16	28,14	22,27	-188,22	-254,27
14		97,16	25,59	19,88	-162,63	-234,39
15		97,16	23,26	17,75	-139,37	-216,64
16		97,16	21,15	15,85	-118,23	-200,79
17		97,16	19,22	14,15	-99,00	-186,64
18		97,16	17,48	12,64	-81,53	-174,00
19		97,16	15,89	11,28	-65,64	-162,72
20		97,16	14,44	10,07	-51,20	-152,65
21		97,16	13,13	8,99	-38,07	-143,65
22		97,16	11,94	8,03	-26,13	-135,62
23		97,16	10,85	7,17	-15,28	-128,45
24		97,16	9,86	6,40	-5,42	-122,05
25		97,16	8,97	5,72	3,55	-116,34
Итого:			881,96	762,07		

Для определения динамического срока окупаемости используем

графический метод. Воспользовавшись мастером диаграмм Microsoft Excel, получаем следующий график (рис. 24).

По графику определяем, что  $T_d$  равен 25 годам, что превышает устанавливаемую величины показателя - 15 лет.

Для нахождения внутренней нормы доходности графическим методом при помощи мастера диаграмм Microsoft Excel строится график при значениях чистого дисконтированного дохода в том году, при котором ЧДД имеет положительное значение при  $E = 0,1$  и ЧДД имеет отрицательное значение при  $E = 0,12$ .

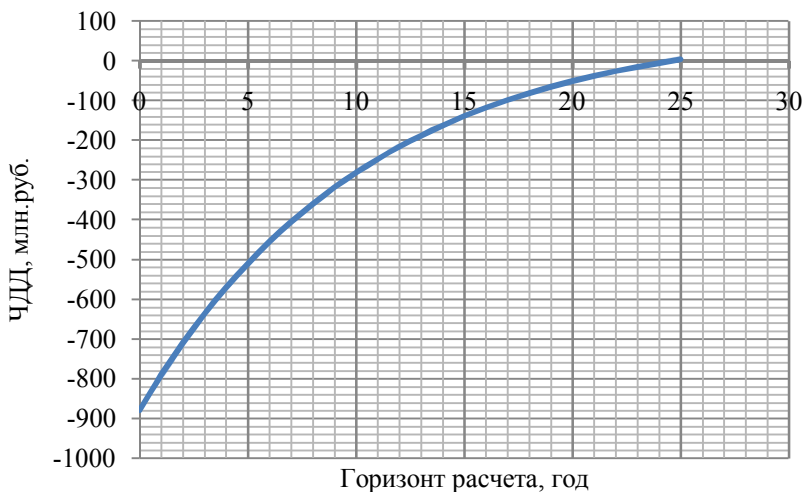


Рис. 24. Определение динамического срока окупаемости

Внутренняя норма доходности  $E_{вн}$  определяется в точке, соответствующей нулевому значению чистого дисконтированного дохода (ЧДД=0), и согласно приведенному ниже графику (рис. 25) равна 10,075 %.

Индекс прибыльности в данном случае равен:

$$PI_{и} = \frac{881,96}{878,41} = 1,004.$$

Мероприятие считается экономически эффективным при  $PI_{и} > 1$ .



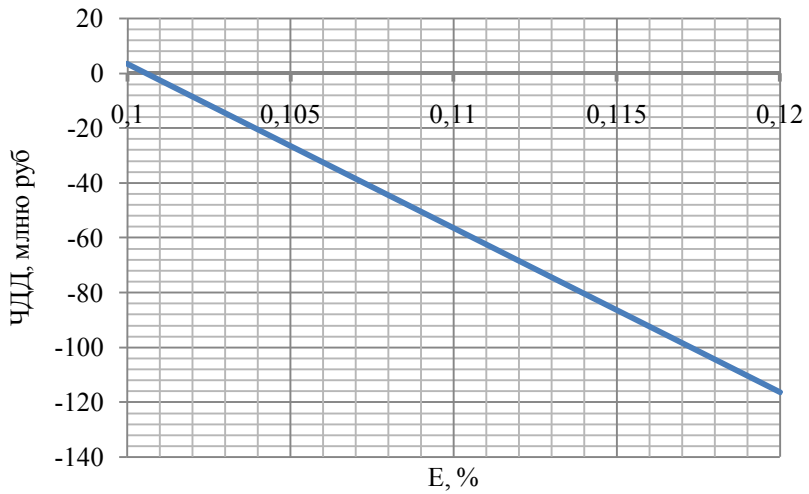


Рис.25. Определение внутренней нормы доходности

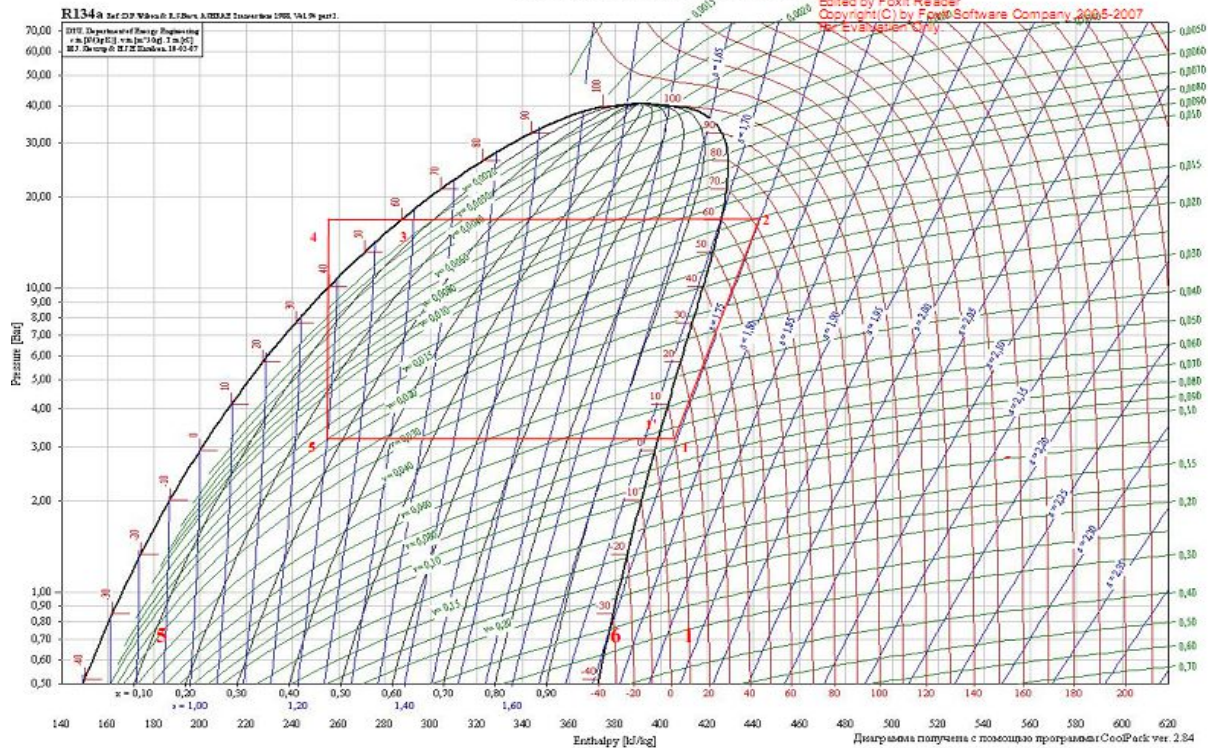
## ЛИТЕРАТУРА

1. Молодежникова Л.И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебное пособие / Л.И. Молодежникова: Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 205 с.
2. В.В. Харитонов. Вторичные теплоэнергоресурсы и охрана окружающей среды / В.В. Харитонов и др.; под ред. В.В. Харитонова. – Минск: Высшая школа, 1988. – 166 с.
3. Reay, D.A. Low Temperature Waste Heat Recovery in the Process Industry. Good Practice Guide No. 141. 1996.
4. Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B.F. and Lemort, V. Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles, Applied Thermal Engineering 31:2885-2893, 2011.
5. Bombarda, P., Invernizzi, C. M. and Pietra, C. Heat recovery from diesel engines, a thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles, Applied Thermal Engineering, 30:212-219, 2010.
6. Colonna, P. and Gabrielli, S. Industrial trigeneration using ammonia-water absorption refrigeration systems (AAR), Applied Thermal Engineering, 23:381-396, 2003.
7. Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, BCS Incorporated, Report to U.S. DOE
8. Industrial Technologies Program, March 2008.
9. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов / О.Л. Данилов [и др.]; под ред. А.В. Клименко. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 424 с.
10. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А.А.Кудинов А.А. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 139 с.
11. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита/ В.М. Фокин В.М. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 256 С.
12. Везиришвилли О. Ш., Меладзе Н. В. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло и хладоснабжения. М.: МЭИ, 1994.

# Приложение

log(P)-i диаграмма для хладагента R134a

Edited by Foxit Reader  
Copyright (C) by Foxit Software Company, 2005-2007  
All Rights Reserved



Учебное издание

**Ивашенко** Елена Юрьевна

## **ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ОТХОДОВ**

Учебно-методическое пособие  
по дисциплине «Вторичные энергетические ресурсы»

для студентов специальности  
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии  
и энергетический менеджмент»

Подписано в печать 29.12.2014.  
Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 2. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 6,3. Уч. изд. л. 4,6. Тираж 100. Заказ 103.

Белорусский национальный технический университет  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий №1/173  
от 12.02.2014г.

Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск

Отпечатано в РУП «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».  
Свидетельство о государственной регистрации  
Издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№2/17 от 26.11.2013.

Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск