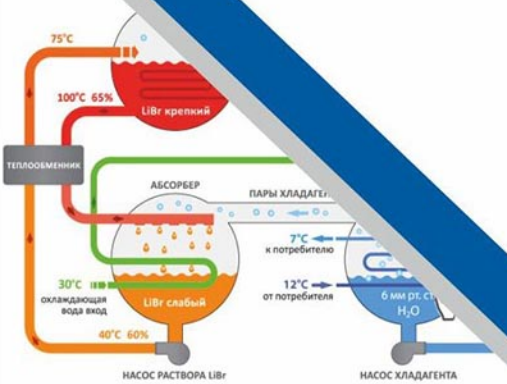
НГТУ НЭТИ | Факультет энергетики

С. Л. ЕЛИСТРАТОВ
Н. В. МИРОНОВА

ПАРОКОМПРЕССИОННЫЕ ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ



НОВОСИБИРСК
2020

УДК 621.577(075.8)
Е 516

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *П.А. Щинников*
д-р техн. наук, профессор *А.И. Алифёров*

Работа подготовлена кафедрой тепловых электрических станций по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» для студентов IV курса ФЭН всех форм обучения по направлению 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

Елистратов С.Л.

Е 516 Парокомпрессионные теплонасосные установки : учебное пособие / С. Л. Елистратов, Н. В. Миронова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 92 с.

ISBN 978-5-7782-4214-2

Цель настоящего издания – закрепление теоретического материала по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» на примере термодинамического расчета и анализа эффективности циклов парокомпрессионного теплового насоса (ПКТН) с однокомпонентными низкокипящими рабочими телами естественного и искусственного происхождения.

В состав пособия входят указания по определению параметров в узловых точках семи различных рабочих циклов, определению удельных тепловых нагрузок отдельных аппаратов, эксергетических потерь и эксергетических КПД отдельных элементов и ПКТН в целом, а также рекомендации по построению обобщенной диаграммы потоков энергии и эксергии в системе «ТЭС–ЛЭП–ПКТН» с указанием относительных потерь эксергии и показателей эффективности.

На основе критического анализа результатов расчета термодинамических циклов предложены основные направления конструктивного совершенствования ПКТН.

УДК 621.577(075.8)

ISBN 978-5-7782-4214-2

© Елистратов С.Л., Миронова Н.В., 2020
© Новосибирский государственный технический университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение....3
1. Теоретический материал 7
1.1. Общие сведения....7
1.1.1. Назначение и общая классификация тепловых насосов 7
1.1.2. Показатели энергетической эффективности 12
1.2. Место и роль ТН в преобразовании различных по качеству потоков энергии 13
1.3. Источники низкопотенциального тепла....16
1.4. Системные преимущества теплонасосных технологий теплоснабжения....21
1.5. Актуальные направления развития теплоснабжающих систем с тепловыми насосами....22
1.5.1. Низкотемпературные системы теплоснабжения....22
1.5.2. Замена экологически опасных теплоисточников на ТНУ....23
1.6. Типовые схемы теплонасосных установок 25
1.6.1. ТНУ на базе подземных вод хозяйственно-питьевого назначения 25
1.6.2. ТНУ на базе неочищенных и условно чистых сточных вод 25
1.6.3. Совместное тепло- и хладоснабжение....29
1.6.4. ТНУ на базе теплоты воды рек, озер в зонах рекреации....31
1.7. Основы эксергетического метода 33
1.7.1. Назначение эксергетического метода анализа....33
1.7.2. Теплоэксергия. Температурная эксергетическая функция 35
1.7.3. Химическая эксергия различных видов топлива 38
1.7.4. Принцип неэвивалентности эксергетических потерь....41
1.7.5. Сравнительная эффективность использования химической эксергии топлива теплоисточниками....43
2. Термодинамический и тепловой расчет ПКТН 47
2.1. Определение параметров в узловых точках цикла 48
2.2. Расчет удельных тепловых нагрузок 51
2.3. Определение тепловых нагрузок....52
2.4. Определение расходов теплоносителей внешних теплоприемников и теплоотдатчиков....53
3. Расчет эксергетических потерь ПКТН....54
3.1. Оценка внешних и внутренних потерь эксергии 54
3.2. Определение эксергетических функций теплоносителей....55
3.3. Определение эксергетических потерь в основных элементах ПКТН 57
3.4. Показатели эффективности парокомпрессионных термотрансформаторов 62
Библиографический список....80
Приложения....81

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

С принятием в 2009 году нового закона об энергосбережении возрос интерес к использованию энергии возобновляемых и вторичных источников, в том числе в такой жизненно важной отрасли, как теплоснабжение.

Эффективное замещение в топливном балансе систем промышленного и гражданского теплоснабжения ископаемых видов топлива (уголь, мазут, природный газ и др.) практически неисчерпаемыми ресурсами низкопотенциального (до 40 °С) тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием тепловых насосов (ТН) становится актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды.

В тепловых насосах тепло от тел и сред (низкопотенциальных источников тепла) с низкой температурой переносится к телам и средам с более высокой температурой (потребителям тепловой энергии). В соответствии со вторым законом термодинамики перенос теплоты в количестве Q от холодного источника к более горячему (в направлении, противоположном естественному процессу теплопереноса) должен сопровождаться затратами некоторого количества механической работы или другой работоспособной энергии A. Энергетическую эффективность устройств, работающих по таким обратным термодинамическим циклам, принято оценивать отношением трансформированного количества теплоты к затратам работы на реализацию этого процесса:

$$b = \frac{Q}{A}. \qquad (1.1)$$

Использование теплонасосных установок на базе ТН различного типа (табл. 1.1) является типовым межотраслевым энергосберегающим мероприятием. Они позволяют с малыми затратами первичной энергии (электроэнергии, подведенной теплоты высокого температурного потенциала, энергии сжатых газов и др.) преобразовать теплоту низкого температурного потенциала (до 40 °С) возобновляемых источников (окружающего воздуха, воды рек, озер и морей, грунта, гидротермальных источников и т. п.), а также вторичных источников (оборотной воды систем охлаждения, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод и т. п.) в теплоту более высокого температурного потенциала (45…90 °С), которая может быть использована для целей отопления, горячего водоснабжения и в производственных технологиях.

Классификация ТН по основным признакам представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация тепловых насосов технического назначения

<table>
<tr><th>Классифицирующий признак</th><th colspan="2">Наименование</th><th>Вид приводной энергии</th></tr>
<tr><td rowspan="10">Принцип работы</td><td colspan="2">Компрессионные</td><td rowspan="2">Электрическая, механическая</td></tr>
<tr><td>паровые</td><td>газовые</td></tr>
<tr><td colspan="2">сорбционные</td><td rowspan="2">Тепловая энергия</td></tr>
<tr><td>абсорбционные</td><td>адсорбционные</td></tr>
<tr><td colspan="2">струйные</td><td rowspan="2">Кинетическая энергия пара или газа</td></tr>
<tr><td>эжекторные</td><td>вихревые</td></tr>
<tr><td colspan="2">Термоэлектрические</td><td rowspan="2">Электрическая</td></tr>
<tr><td colspan="2">Магнитные</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Вид используемого цикла</td><td colspan="2">Замкнутый</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Разомкнутый</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Характер трансформации</td><td colspan="2">Повысительная</td></tr>
<tr><td colspan="2">Расщепительная</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Периодичность</td><td colspan="2">Непрерывного действия</td></tr>
<tr><td colspan="2">Периодического действия</td></tr>
</table>

Среди большого числа классифицирующих признаков наиболее важная классификация по циклам: газовые компрессионные, парокомпрессионные, сорбционные (абсорбционные и адсорбционные), вихревые, основанные на эффекте Ранка–Хилша, и др. Общим для них является выполнение второго закона термодинамики.

Широкое практическое развитие в мире получили только два типа ТН: парокомпрессионные, использующие механическую компрессию паров рабочего тела, и абсорбционные (АТН), где сжатие паров осуществляется термохимическим способом с использованием процесса абсорбции. В последних в качестве рабочего тела часто используются водные растворы соли LiBr, поэтому они получили вследствие этого название «абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы» (АБТН) (рис. 1.1).

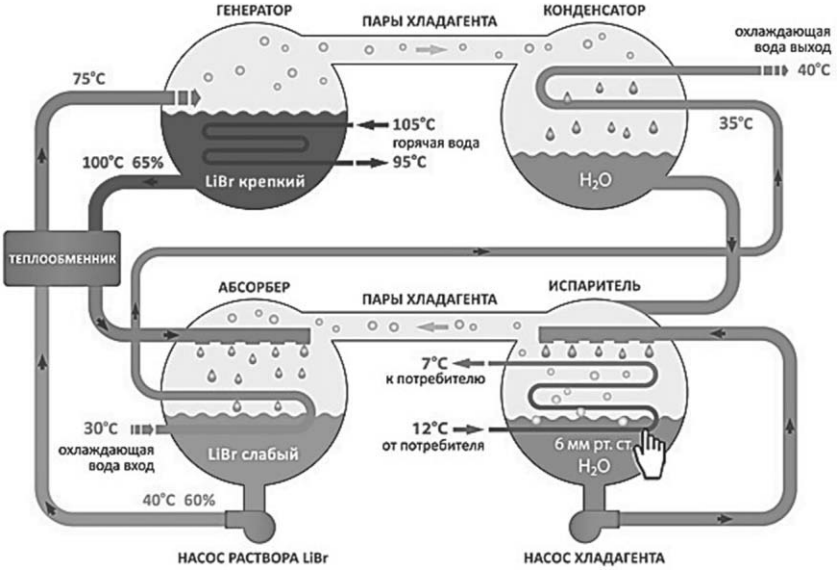


Рис. 1.1. Принципиальная схема абсорбционного термотрансформатора

Парокомпрессионные и абсорбционные преобразователи теплоты могут работать в следующих режимах:

- как *холодильные машины* (ПКХМ, АХМ) в режиме выработки только холода как полезного продукта;
- как *тепловые насосы* при полезном использовании только вырабатываемой ими теплоты;
- для одновременной выработки холода и теплоты как полезных продуктов.

Схема абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины (АБХМ), (рис. 1.1), отражает происходящие рабочие процессы в каждом из четырех ее основных устройств: испарителе, абсорбере, генераторе и конденсаторе. В АБХМ хладагентом (рабочим телом) служит вода,

абсорбентом (поглотителем паров воды) – водный раствор соли бромида лития LiBr высокой концентрации.

Вспомогательное оборудование включает насос для перекачивания водного раствора LiBr и насос для хладагента (воды); для увеличения энергетической эффективности используют дополнительный регенеративный теплообменник, позволяющий повысить температуру слабого раствора LiBr перед генератором.

В испарителе поддерживается пониженное давление – 6 мм рт. ст. При таком низком давлении вода (хладагент) кипит при температуре 4 °С. Насос подает хладагент на поверхность труб, по которым циркулирует охлаждаемая вода с температурой 12 °С, поступающая от потребителя для охлаждения.

Хладагент кипит, принимая теплоту от труб с водой. В итоге к потребителю подается охлажденная вода с температурой 7 °С. Образующийся при кипении хладагента пар необходимо непрерывно удалять из испарителя для поддержания абсолютного давления 6 мм рт. ст. Эту задачу выполняет абсорбер, сблокированный с испарителем. Пар хладагента, поступающий из испарителя в абсорбер, поглощается крепким (65 %) раствором LiBr. Раствор LiBr обладает высокой абсорбирующей способностью, которая растет при увеличении концентрации и/или при понижении температуры раствора. В абсорбере концентрированный раствор LiBr, подаваемый из генератора, поглощает пары хладагента, тем самым понижая свою концентрацию до 60 %, т. е. становится слабым, или разбавленным.

Поглощение паров (абсорбция) является экзотермической реакцией, т. е. реакцией с выделением теплоты, которая, в свою очередь, отводится охлаждающей водой с начальной температурой 30 °С, поступающей от градирни или другого источника. Далее слабый раствор подается насосом в регенеративный теплообменник, в котором этот раствор повышает свою температуру путем теплообмена с концентрированным раствором, поступающим из генератора.

В генераторе за счет подвода тепловой энергии от греющего источника (в нашем случае – горячая вода) вода из слабого раствора LiBr выпаривается, и раствор LiBr снова становится концентрированным (крепким). Крепкий раствор LiBr после генератора направляется обратно в абсорбер.

Водяной пар из генератора поступает в конденсатор, где конденсируется за счет отвода теплоты конденсации к охлаждающей воде

градирни. Сконденсировавшийся из водяных паров хладагент (вода) вновь поступает в испаритель, и цикл повторяется заново.

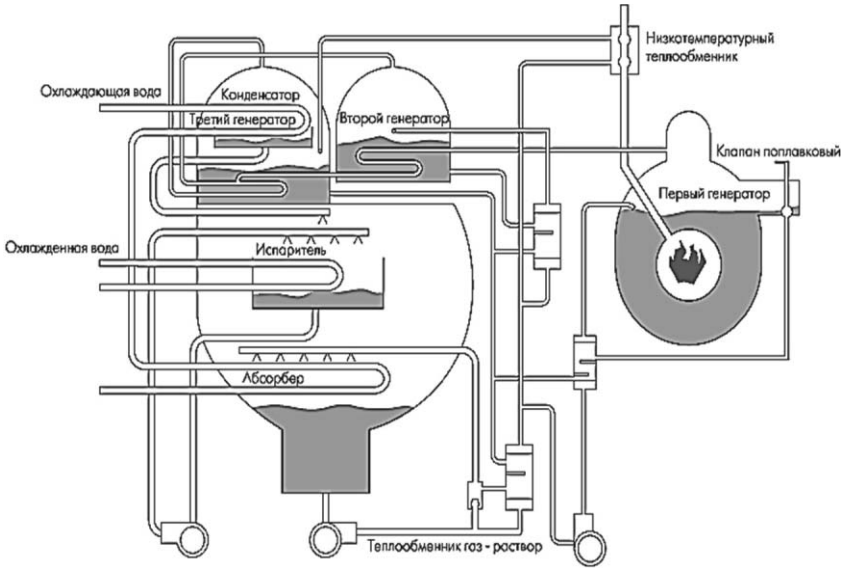


Рис. 1.2. Абсорбционный термотрансформатор с трехступенчатым генератором

Если в представленной на рис. 1.1 схеме теплоту, выделившуюся в абсорбере и конденсаторе, использовать для нужд отопления, горячего водоснабжения или в технологических процессах, то можно перевести работу АБХМ в режим работы абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса (АБТН) или в режим одновременной выработки холода в испарителе и теплоты в конденсаторе и абсорбере. При неработающем испарителе ($Q_{\text{И}} = 0$) термотрансформатор вырабатывает только тепловую энергию ($Q_{\text{Г}} = Q_{\text{К}}$), по аналогии с топливной котельной.

Тепловой баланс абсорбционного термотрансформатора (АБХМ или АБТН) имеет вид

$$Q_{\text{Г}} + Q_{\text{И}} = Q_{\text{А}} + Q_{\text{К}}, \qquad (1.2)$$

где $Q_{\text{К}}, Q_{\text{А}}, Q_{\text{И}}$ и $Q_{\text{Г}}$ – соответственно количество теплоты, отведенное потребителю тепловой энергии из конденсатора, абсорбера и подведенное к испарителю и генератору.

В современных схемах АБХМ и АБТН применяются многоступенчатые процессы десорбции и абсорбции, позволяющие существенно повысить энергетическую эффективность их работы. Схема с трехступенчатым генератором с огневым обогревом показана на рис. 1.2.

Образующийся в первом генераторе пар служит источником теплоты для выпаривания раствора во втором генераторе, а образующийся в нем пар – источником тепловой энергии для выпаривания воды из раствора в третьем генераторе.

1.1.2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В соответствии с общим определением эффективности устройств, работающих по обратным термодинамическим циклам (1.1), для оценки энергетической эффективности работы ПКТН и АТН в общем виде используют соответственно следующие показатели:

- *коэффициент преобразования*

$$\varphi = \frac{Q}{N}; \tag{1.3}$$

- *коэффициент термотрансформации*

$$\mu = \frac{Q}{Q_{\Gamma}}, \tag{1.4}$$

где Q – количество теплоты, отдаваемой от ТН потребителю; N – затраты электроэнергии или механической работы на привод компрессора; Q_{Γ} – затраты тепловой энергии высокого потенциала (пар, горячая вода, тепло дымовых газов и др.) для десорбции водно-солевого раствора в генераторе.

Многоступенчатое выпаривание позволяет повысить энергетическую эффективность АБТН. Для процессов с одноступенчатым генератором $\mu = 1{,}7$, с двухступенчатым $\mu = 2{,}2$, а с трехступенчатым $\mu = 2{,}8$.

Для ориентировочной оценки эффективности работы ПКТН в режиме отопления можно использовать экспериментальную зависимость коэффициента преобразования от разности температур в конденсаторе и испарителе (рис. 1.3).

Представленная на рис. 1.3 зависимость показывает, что эффективность применения ПКТН растет при уменьшении разности температур ($\Delta T = T_{\text{К}} - T_{\text{И}}$) и, наоборот, снижается при ее повышении. При существующих средних удельных затратах топлива на котельных 37,7 кг у.т/ГДж