

Применение абсорбционных технологий для одновременной утилизации тепла и получения холода для различных нужд.

(дополнение к курсу лекций «Тепловые насосы и термотрансформаторы» и «Тепло-использующие холодильные машины» (СПбГУНиПТ) г. Санкт-Петербург))

Принцип действия абсорбционного чиллера

1-1. Почему нагревание охлаждает?

Охлаждение означает поддержание температуры в помещении ниже внешней температуры, как показано на рис. 1-1, требуется переместить тепло из помещения с низкой температурой (28°C или $82,4^{\circ}\text{F}$) в атмосферу с более высокой температурой. Но в природе тепло не может перемещаться от низкой температуры в направлении более высокой. Таким образом, для переноса тепла, необходимы другие методы, отличные от этого принципа. То есть, тепловой насос (чиллер) используется для перекачивания тепла от низкой температуры, как если бы водяной насос использовался бы для перекачивания воды из глубоких скважин.

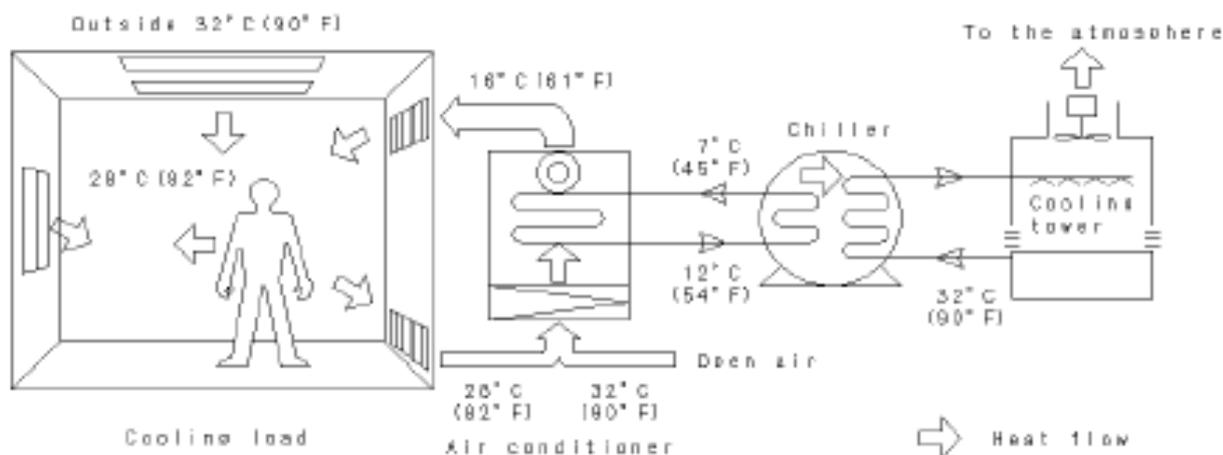


Fig. 1-1 Heat flow

Типичный чиллер, использующий электроэнергию в качестве источника рабочей энергии, как конвейера для переноса теплоты, показанного на рис. 1-2 это центробежный чиллер и типичный чиллер, использующий тепловую энергию—это абсорбционный чиллер. Охлаждённая вода получается путём использования скрытой теплоты, получаемой при испарении жидкости. Мы можем наблюдать этот принцип в нашей повседневной жизни. Например, при инъекции, после нанесения спирта на руку, мы чувствуем холод этим местом. По той причине, что нанесённый спирт забрал тепло от руки, когда он нагрелся до температуры тела и испарился. Другой пример – то, что мы чувствуем прохладу когда потеем в жаркий день или занимаясь спортом. Потому что теплота тела охлаждается при испарении пота, который забирает тепло от тела. Чиллер также использует скрытую теплоту испарения. Но для повторного использования испаренного пара требуется возвращение в жидкость. Для этого компрессор используется в центробежных чиллерах и абсорбент химически используется в абсорбционных чиллерах. Абсорбент теряет эффективность. Потому что его концентрация уменьшается по мере поглощения пара. Для восстановления поглощающей способности необходим процесс концентрирования абсорбента путем нагрева.

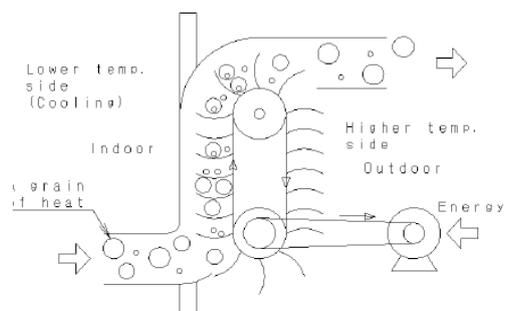


Fig. 1-2 Heat flow at cooling

1-2. Что такое скрытая теплота?

Когда вода нагревается, её температура растёт и останавливается при 100°C (212°F). При постоянной температуре около 100°C настолько долго насколько нагревается. Как только

вода достигает 100°C , все дополнительное тепло переходит в изменение её из жидкости в пар. При 100°C так как пар легче окружающего воздуха, он поднимается. При этом вода превращается из жидкости в пар, подведенное тепло не меняет её температуру, а изменяет состояние воды. Поэтому теплота называется скрытой или *неявной*. Таким образом скрытая теплота относится к энергии, поглощенной жидкостью при изменении её состояния, т.е., к пару без изменения его текущей температуры. Явная теплота та, которая приводит к изменению температуры, но не к изменению состояния.

1-3. Основные элементы абсорбционного чиллера

Ниже следуют 3 условия в основе абсорбционного чиллера.

а. Внутри чиллера – вакуум.

б. Вода используется как хладагент (Минимальная температура охлажденной воды на выходе: $5^{\circ}\text{C} = 41^{\circ}\text{F}$)

в. Водный раствор бромида лития, который имеет свойство поглощать водяной пар, используется в качестве абсорбента

1-3-1 Вакуум и вода

Мы живём на Земле, которая подвергается давлению веса *столба* воздуха *величиной* приблизительно 10 км (6 миль) который окружает Землю и это давление называется атмосферным давлением. Давление меньшее атмосферного называется вакуумом. При объяснении вакуума для абсорбционного чиллера необходимо знать соотношение между давлением и температурой испарения воды. В повседневной жизни вода кипит (испаряется) при 100°C и при атмосферном давлении. Когда давление больше, чем атмосферное, температура кипения воды больше 100°C . И, если, давление ниже (вакуум), температура кипения ниже чем 100°C .

Давление выше атмосферного можно наблюдать в бойлере. Давление ниже атмосферного можно испытать при восхождении в горы. А именно, в горах, так как слой воздуха становится тоньше с подъемом, давление, *которое должно соответствовать* становится низким. По этой причине вода кипит в горах при температуре ниже 100°C . Другими словами, температура кипения воды зависит от давления. В чиллере всегда поддерживается глубокий вакуум. В этом состоянии вода кипит при очень низкой температуре. Например, при абсолютном давлении 0,5 кПа вода кипит при температуре 5°C .

1-3-2 Бромид лития

Бромид лития - это вещество, полученное из лития, полученного из руды лития и брома, полученного из морской воды. Это вещество не знакомо нам. Но мы можем легко догадаться что это бромид лития. То есть, мы обычно представляем себе соль. Подобное название соли – хлорид натрия.

Они состоят из одних и тех же элементов, т.е., литий (Li) и натрий (Na) являются щелочными металлами, в то время как Бром (Br) и хлор (Cl) – галогены. LiBr и NaCl – вещества одинаковых химических групп и имеют схожие характеристики. Особенно, для обоих веществ характерно поглощать влагу (водяной пар). Это свойство абсорбировать влагу LiBr сильнее, чем у NaCl. Абсорбционный чиллер использует это свойство. Чем выше концентрация и ниже температура у водного раствора LiBr, тем сильнее свойство (поглощающая способность).

1-4. Основы модели с полной реализацией цикла

Теплообменные трубы, установленные внутри закрытого сосуда (аппарата). К тому же давление в сосуде откано приблизительно до 0,8 кПа (абс.). Капли воды (хладагента) падают на теплообменные трубы.

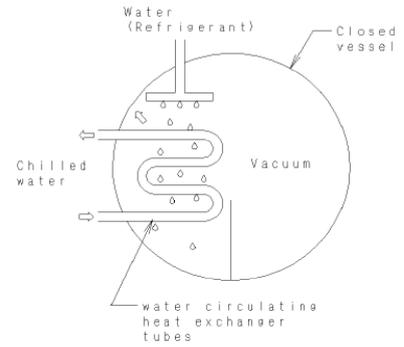


Fig. 1-3 Evaporation process

Теперь аппарат имеет вакуум порядка 0,8 кПа (абс.). Капли хладагента падая на теплообменные трубы испаряются при 5 °С в то же время они поглощают тепло воды внутри теплообменных труб. Охлаждённая таким образом вода в теплообменных труб ах может быть использована для охлаждения. К тому же капли концентрированного раствора бромида лития падают в аппарате. Раствор бромида лития поглощает испаренный хладагент.

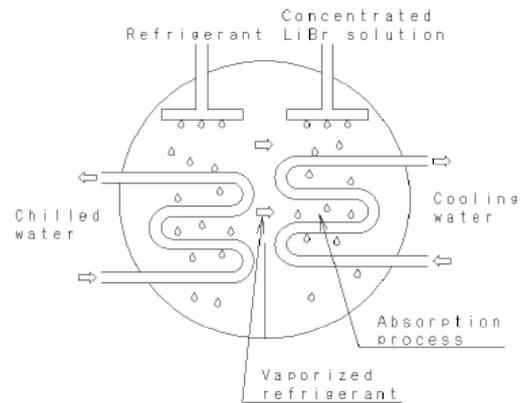


Fig. 1-4 Absorbing process

Когда раствор LiBr поглощает пары хладагента, он разбавляется и теряет поглощающую способность. Это значит, что концентрированный раствор LiBr должен подаваться непрерывно. На данном этапе, разбавленный раствор нагревается подводимым источником тепла. Тепло заставляет раствор высвободить абсорбированный хладагент, а также реконцентрирует (регенерирует) раствор.

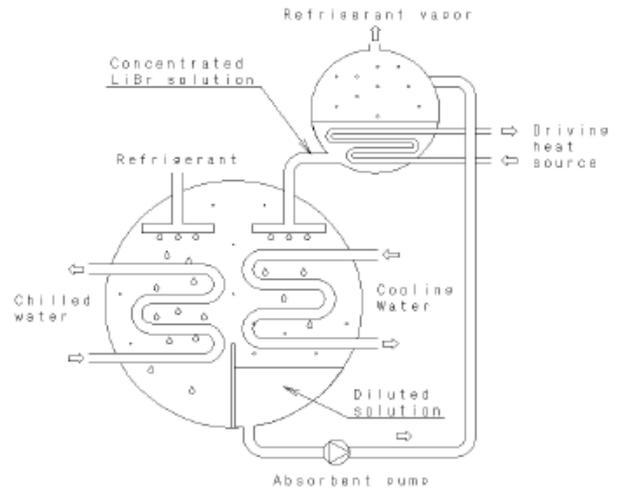
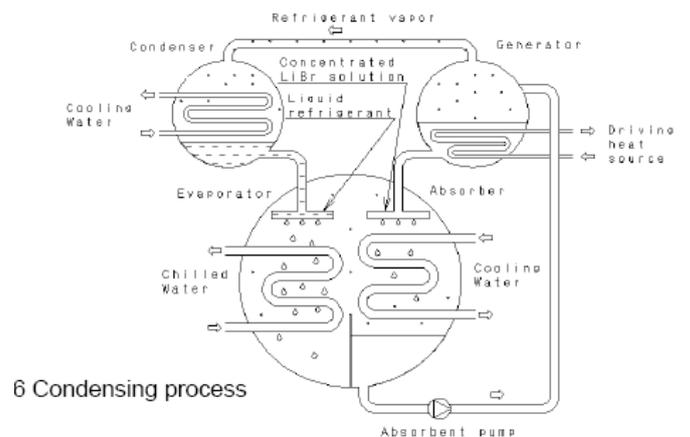


Fig. 1-5 Concentrating process

Пары хладагента, которые высвобождаются при нагревании, охлаждаются в отдельном аппарате (конденсаторе) для того чтобы стать жидким хладагентом. Капли этой воды снова вводятся в вакуумный аппарат и используются вновь.



6 Condensing process

ТОГО
ча-

Это основной рабочий цикл абсорбционного чиллера одинарного эффекта. Охлаждающая вода проходит через абсорбер и конденсатор. Охлаждающая вода в конденсаторе конденсирует пар (*вторичный*) из генератора обратно в хладагент. Охлаждающая вода в абсорбере поглощает тепло выделившееся при поглощении паров хладагента раствором бромида лития.

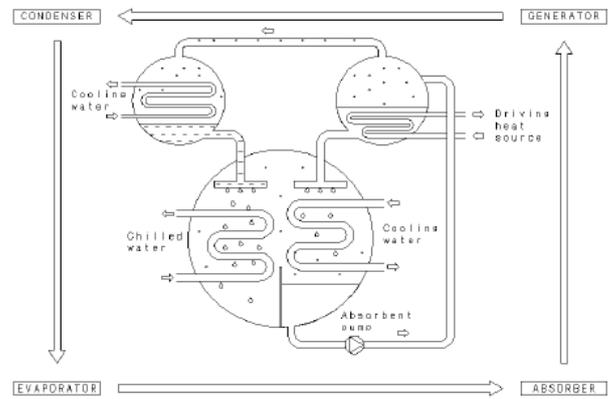


Fig. 1-7 Single effect cooling cycle

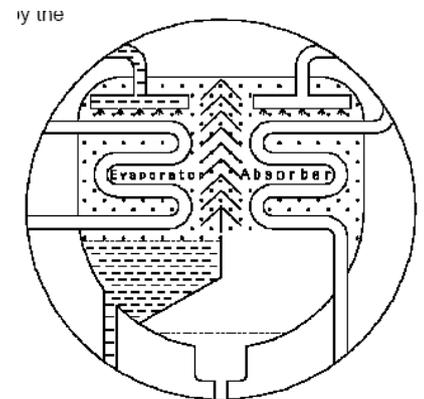
1-5. Описание каждого аппарата

Испаритель

Хладагент распределяется на теплообменных трубах испарителя. Охлаждаемая вода, проходящая внутри труб, охлаждается скрытым теплом испарения хладагента

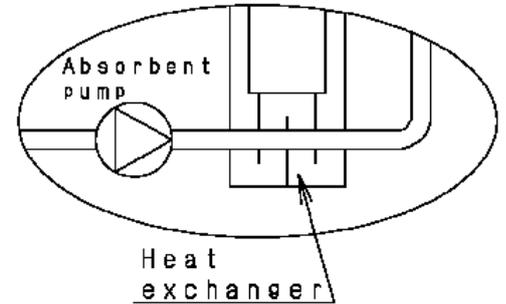
Абсорбер

Концентрированный раствор LiBr распределяется на теплообменных трубах абсорбера. Пар из испарителя поглощается концентрированным раствором LiBr на трубах. Охлаждающая вода проходя по трубам, нагревается теплотой абсорбции.



Теплообменник

Разбавленный раствор из абсорбера проходит через теплообменник где нагревается концентрированным раствором LiBr. Разбавленный раствор после теплообменника поступает в генератор.



Генератор (десорбер)

Разбавленный раствор из теплообменника нагревается в генераторе. Он высвобождает пар и концентрируется. Раствор становится концентрированным.

Конденсатор

Пар из генератора конденсируется на теплообменных трубах конденсатора. Охлаждающая вода из абсорбера нагревается скрытой теплотой конденсации.

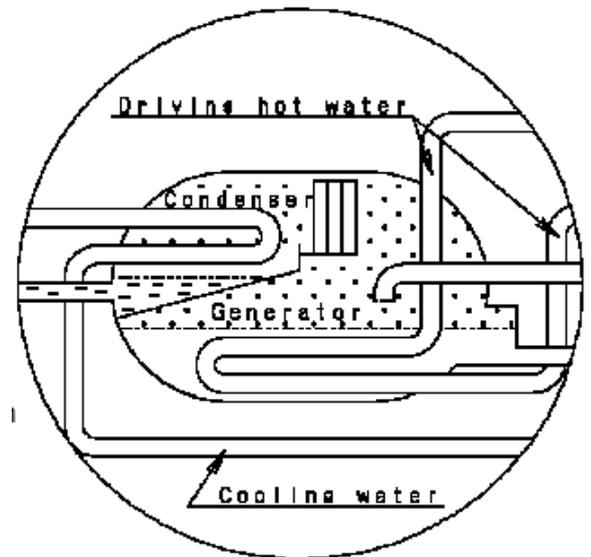


Fig. 1-10

Подогреватель (утилизатор конденсата греющего пара. Только для паровых машин)

Разбавленный раствор, проходящий из теплооб-

менника к генератору, нагревается движущимся потоком, сконденсированным в генераторе.

1-6. Типовой холодильный цикл на диаграмме Дюринга

Рабочий цикл одинарного эффекта изображен с использованием нижеследующей диаграммы Дюринга

Линия **A-B** показывает процесс абсорбции в абсорбере.

Раствор абсорбента с концентрацией около 59,5% (точка A) абсорбирует пары хладагента, поступающие из испарителя по мере того как он охлаждается до температуры 34,2 °C охлаждающей водой, затем раствор абсорбента становится разбавленным с концентрацией 55,0% (точка B).

Давление между точками A и B составляет 0,84 кПа, что эквивалентно давлению насыщенных паров воды при температуре 4,4 °C, таким образом, в испарителе может быть получена охлажденная вода с температурой 8 °C.

Линия **B-C** показывает процесс повышения температуры разбавленного раствора в теплообменнике.

В то время как температура слабого раствора проходит через теплообменник, разбавленный раствор получает тепло от концентрированного раствора идущего из генератора тем самым его температура поднимается до точки C.

Линия **C-D-E** показывает процесс нагревания и концентрирования разбавленного раствора в генераторе.

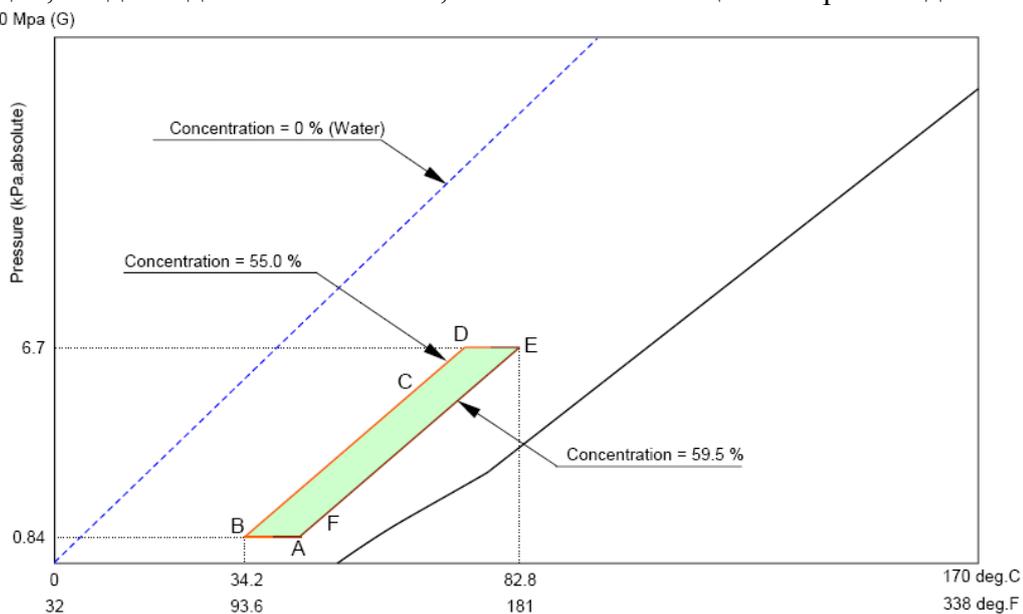
Слабый раствор от точки C нагревается до точки D подводимым источником тепла (горячей водой). После чего слабый раствор нагревается далее до тех пор пока он не освободит пар хладагента. Следовательно, он становится концентрированным раствором с концентрацией порядка 59,5% в точке E.

Линия **E-F** показывает процесс снижения температуры концентрированного раствора LiBr в теплообменнике.

..... концентрированный раствор LiBr отдает тепло слабому раствору бромида лития, поступающего из абсорбера. .. его температура снижается до точки F.

Линия **F-A** показывает процесс снижения температуры концентрированного раствора LiBr в абсорбере.

Концентрированный раствор LiBr (точка F) поступает в абсорбер и охлаждается охлаждающей водой, когда он достигает точки A, начинается поглощение паров хладагента. Этот процесс



1-6В. Типовой холодильный цикл на диаграмме Дюринга

Рабочий цикл одинарного эффекта изображен с использованием нижеследующей диаграммы Дюринга

1-7. Тепловой баланс и к-т мощности.

Тепловой баланс

Для того чтобы проверить верны ли результаты измерений используется тепловой баланс.

Основное положение теплового баланса: количество теплоты вошедшее в чиллер = количеству теплоты вышедшему из чиллера.

Вышерассмотренное предположение показывает формула: $(Q_a + Q_c) / (Q_e + Q_g) = 1$

Q_e : количество тепла, вошедшее в чиллер через испаритель

Q_g : количество тепла, вошедшее в чиллер через генератор

Q_a : количество тепла, вышедшее из чиллера через абсорбер

Q_c : количество тепла, вышедшее из чиллера через конденсатор

В системе СИ:

$$Q_e = (CH_i - CH_o) \times F_e \times 1000 / 860$$

$$Q_g = (Hi - Ho) \times F_g \times 1000 / 860$$

$$Q_a + Q_c = (CO_o - CO_i) \times F_c \times 1000 / 860$$

Example

$$CH_i = 12.2 \text{ deg.C} \quad Q_e = 352 \text{ kW}$$

$$CH_o = 6.7 \text{ deg.C} \quad Q_g = 503 \text{ kW}$$

$$F_e = 54.5 \text{ m}^3/\text{h} \quad Q_e + Q_g = 855 \text{ kW}$$

$$CO_i = 29.4 \text{ deg.C} \quad Q_a + Q_c = 851 \text{ kW}$$

$$CO_o = 38.4 \text{ deg.C} \quad \text{Heat balance} = 1.00$$

$$F_c = 81.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Hi = 95.0 \text{ deg.C}$$

$$Ho = 86.0 \text{ deg.C}$$

$$F_g = 49.8 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 48.0 \text{ ton/h}$$

(at 90.5 deg.C S.G. = 0.965)

В единицах измерения США:

$$Q_e = (CH_i - CH_o) \times F_e \times 500$$

$$Q_g = (Hi - Ho) \times F_g \times 500$$

$$Q_a + Q_c = (CO_o - CO_i) \times F_c \times 500$$

Example

$$CH_i = 54 \text{ deg.F} \quad Q_e = 1,200,000 \text{ BTU}$$

$$CH_o = 44 \text{ deg.F} \quad Q_g = 1,711,814 \text{ BTU}$$

$$F_e = 240 \text{ gpm} \quad Q_e + Q_g = 2,911,814 \text{ BTU}$$

$$CO_i = 85 \text{ deg.F} \quad Q_a + Q_c = 2,898,000 \text{ BTU}$$

$$CO_o = 101.1 \text{ deg.F} \quad \text{Heat balance} = 1.00$$

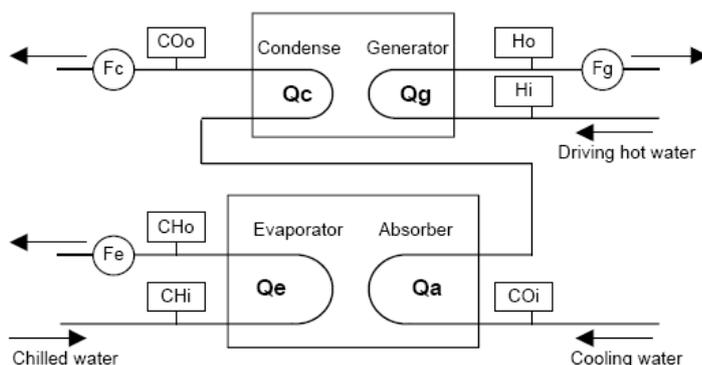
$$F_c = 360 \text{ gpm}$$

$$Hi = 203 \text{ deg.F}$$

$$Ho = 186.8 \text{ deg.F}$$

$$F_g = 219 \text{ gpm} \rightarrow 211 \text{ gpm}$$

(at 194.9 deg.F S.G. = 0.965)



Коэффициент мощности

Коэффициент мощности показан в нижеследующей формуле. Коэффициент мощности чиллеров из серии с низкотемпературным водяным обогревом составляет около 0,7 при условии стандартных характеристик. Это значение может меняться в зависимости от требуемых характеристик. В случае если, рабочие характеристики записаны, если при этом COP сильно отличается от заявленного, возможно не-

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g}$$

правильная запись данных или недостаточная холодильная нагрузка.

Примечание: при вычислении теплового баланса и COP, температура охлаждающей воды на входе и холодильная нагрузка должны быть постоянными в течение 10-15 минут. Ввиду того что реакция абсорбционного чиллера не такая быстрая в сравнении с электрическим типом чиллеров.

1. Использование утилизируемого тепла для абсорбционного охлаждения.

Когда тепло выделяется, например в производственном процессе или процессе производства энергии, как правило, получают температуры, которые слишком малы для непосредственного применения в этих процессах. Это тепло может быть каскадно использовано во втором процессе с более низкими требованиями по качеству теплоты, т.е. температуры, или преобразовано путём трансформации, например с использованием теплового насоса.

Абсорбционные чиллеры и тепловые насосы имеют общее свойство работать на низкотемпературном тепле и, поэтому, могут играть важную роль в каскадных энергетических системах. Однако недостатком всего абсорбционного оборудования является то, что коэффициент полезного действия (КПД), относительно низок по сравнению с КПД механических чиллеров, которые используют высококачественную энергию такую как электричество или работу вала. Этот недостаток является следствием относительно низкой разницы температур между источником и потребителем тепла.

В применениях, рассматриваемых в настоящее время, планируется использовать абсорбционные холодильные машины (АХМ) для получения охлаждённой воды для целей кондиционирования, как часть системы тригенерации для гостиниц. Основным источником тепла является природный или бытовой газ. Двигатель внутреннего сгорания обеспечивает рабочий вал электрического генератора, таким образом, вырабатываемая электроэнергия обеспечивает (покрывает) потребность потребителя. Сбросное тепло отводится от двигателя в виде горячей воды из радиатора и выхлопных газов. Это тепло предполагают использовать для получения горячей воды для отопления зданий, а также для производства холодной воды в АХМ.

2. Абсорбционные технологии

Абсорбционное охлаждение, замораживание и теплонасосные технологии являются на сегодняшний день хорошо зарекомендованными. Абсорбционные машины (АМ), которые являются коммерчески выгодными, работая на паре, горячей воде или на сжигании газов. Хотя существует много различных применений, которые могут быть предложены, основным рынком в большинстве стран является производство холодной воды для кондиционирования зданий. Так как экономические условия отличаются от страны к стране, абсорбционные системы могут в то же самое время занимать малый сегмент рынка в одной стране и доминирующей технологией в другой стране.

Основной принцип АХМ может быть проиллюстрирован на рисунке 1. В простейшем виде АХМ состоит из испарителя, конденсатора, абсорбера, генератора и растворного насоса.

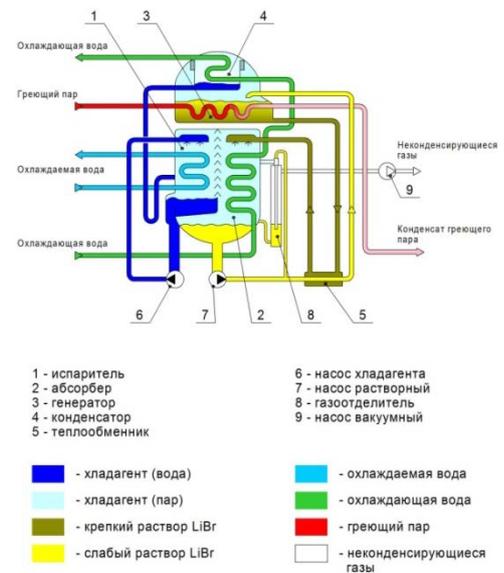


Рисунок 1. Принципиальная схема АХМ.

В компрессионной холодильной машине (КХМ) холод получают в испарителе, где хладагент или рабочая среда испаряется и тепло отводится в конденсатор, где хладагент конденсируется. Энергия увеличения тепла от низкой к более высокой температуре подводится в виде механической энергии к компрессору.

В абсорбционных машинах «сжатие» хладагента реализуется в комбинации абсорбером, растворным насосом и генератором вместо механического парового компрессора. Пар, полученный в испарителе, поглощается жидким абсорбентом в абсорбере. Абсорбент, поглотивший хладагент перекачивается в генератор, где хладагент освобождается от пара, который конденсируется в конденсаторе. Регенерированный или крепкий раствор при возвращении в абсорбер поглощает пары хладагента. Тепло подводится к генератору при сравнительно высокой температуре и отводится от абсорбера при сравнительно низкой температуре аналогично двигателю внутреннего сгорания. Выражение «термохимический компрессор» использовано в специальной литературе для того чтобы описать функции генератора и абсорбера как половины абсорбционного цикла.

Хладагент и абсорбент в абсорбционном цикле основывают рабочую пару. В течение многих лет множество пар было опробовано, но только две из них широко себя зарекомендовали: аммиак с водой как абсорбент и вода вместе с водным раствором бромида лития как абсорбент. Водоаммиачная пара встречается в основном в ходильных установках с низкими температурами испарения, ниже 0°C . Пара вода-бромид лития широко используется для систем кондиционирования, где не нужно охлаждать $5-7^{\circ}\text{C}$. Уровень давления в водоаммиачной машине обычно превышает атмосферное, в то время как бромистолитиевые машины работают при вакууме.

Тепловые потоки в основном цикле следующие:

- Тепло подводится в испаритель и охлаждение производится на уровне низких температур;
- Тепло отводится в конденсаторе на среднем температурном уровне;
- Тепло отводится из абсорбера также на среднем температурном уровне;
- Тепло подводится в генератор на высокотемпературном уровне.

Температура теплоносителя, покидающего абсорбер, может быть той же самой, что и покидающего конденсатор. Такой случай может быть изображен в трехтемпературной системе, как это обычно описано в литературе, например (Niebergall, 1961). Однако, в некоторых случаях может быть целесообразно пропускать хладагент через абсорбер и конденсатор, в этом случае имеет место быть четырехтемпературная система.

Когда температура в испарителе и температура отведения тепла выбраны, самая низкая температура при которой тепло может быть применена к генератору, также определена. Например, температура испарения 2°C и температура теплоносителя, отводящего тепло составляет 37°C , говорят о том что самая низкая температура греющей среды, подводимой к генератору должна быть не ниже 90°C . На практике, соображения по расходу греющей среды и площади теплообменной поверхности, которые могут быть экономически обоснованными, могут увеличить этот нижний уровень до 100°C или 110°C и т.д. Обычно достижение таких уровней температуры в греющей среде не проблема в практических системах, так как первичная энергия может являться топливом и температуры сгорания много выше 100°C или система подачи пара. Качество тепла, его высокая температура в некотором смысле может быть «напрасной», но это компенсируется более компактной и эффективной конструкцией оборудования.

Основной цикл показано на рисунке 1, может быть изменен по нескольким направлениям. Оно из них использовать все имеющиеся возможности для рекуперации тепла в цикле для того чтобы улучшить экономию тепла в цикле. Например, это обычно заключается в теплообмене потоков слабого раствора, покидающего абсорбер с крепким раствором, приводимым обратно в абсорбер. Когда все возможности по восстановлению теплоты, которые могут быть разумно использованы, заложены в проект машины, она получает холодильный коэффициент трансформации приблизительно 0,7 для бромистолитиевых систем, и примерно 0,6 для водоаммиачных систем.

Дальнейшие улучшения могут быть получены применением *высокотемпературного генератора*. Так называемая двухступенчатая система объединяет блоки два генератора – абсорбер, установленные, см. рисунок 2, в целях экономии получаемого тепла приблизительно вдвое. Подаваемое тепло с температуре 170°C поступает в первый генератор *a*, *отводимый пар* используется для обогрева второго генератора на более низком уровне, *при температуре 100°C как водноступенчатой машине, изображенной на рисунке 1*. КПД таких систем с водой и бромидом лития в качестве рабочих пар может составлять 1,2, что значительно лучше, чем 0,7 для одноступенчатых систем. Удвоения одинарного эффекта нет по причине несовершенства теплообмена между потоками раствора, в некоторой степени, и потому, что теплота испарения хладагента несколько больше при его выпаривании из раствора, нежели при выпаривании из чистой жидкости.

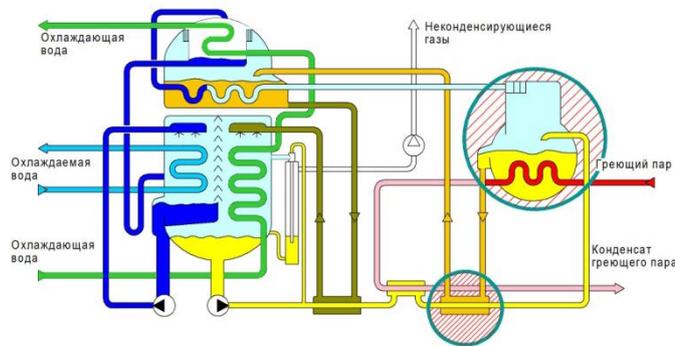


Рисунок 2. Принципиальная схема двухступенчатой АХМ.

Следствием высокой температуры в части машины является то, что давление в этой части также возрастает. Это приемлемо для АБХМ. И это неприемлемо для водоаммиачных машин так как давление свыше 20 bar (2 МПа) может создать угрозу безопасности. Это является причиной, по которой двухступенчатые машины с рабочими парами аммиак-вода использующих схему генераторов, как на рисунке 2, редко встречаются.

3. Системы тригенерации

Тригенерация означает одновременное производство энергии (электроэнергии), тепла и холода. Если СНР, совместное производство тепла и энергии широко известная аббревиатура (акроним) для когенерации, то СНСР может быть менее знакомым акронимом для тригенерации – совместной выработке тепла, холода и электроэнергии. Современный американский акроним ВСНР означает строительный холод, тепло и электроэнергия для приложений тригенерации в строительстве. В Германии соответствующие акронимы КWK – когенерация или ВНКW – ТЭЦ, и КWKК – когенерация с производством холода, соответственно.

Система тригенерации на самом деле может состоят из множества технологий: *топливных элементов*, двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин, центробежных чиллеров и т.д. Более того, они могут быть в различных сочетаниях для того чтобы обеспечить оптимальное использование первичной энергии, главным образом топлива. для того чтобы производить желаемое сочетание электроэнергии, тепла и холода.

- Природный газ сгорает в двигателе внутреннего сгорания, который вращает рабочий вал электрогенератора, таким образом, превращая природный газ в электроэнергию.
- Теплота выхлопных газов утилизируется, например, в котле-утилизаторе и подаётся в АБХМ в виде пара или в виде горячей воды.
- Тепло, отводимое теплоносителем от радиатора двигателя должно использоваться, как санитарная горячая вода. Когда в этом нет необходимости, тепло отводится в окружающую среду посредством градирни.
- АБХМ работает на паре или горячей воде и производит холодную воду, отводя тепло от охлаждающего контура.
- Тепло отводимое АБХМ, удаляется во внешнюю среду посредством градирен.

Следующие ограничения справедливы для системы:

- Выхлопные газы покидают двигатель внутреннего сгорания при температуре от 250 до 550 °С.
- Выхлопные газы не могут быть охлаждены в экономайзере ниже 175 °С. Теплота конденсации водяного пара в выхлопных газах не утилизируется.
- Охлажденная вода покидает АБХМ при температуре 6-7 °С и возвращается в машину при 12 °С.
- Охлаждающая вода отводится градирней от машины при температуре 32/37 °С, т.е., охлаждающая вода покидает АБХМ при температуре 37 °С, охлаждается в градирне до 32 °С и возвращается в машину.

Таким образом, компоненты тригенерационной системы, специфические для абсорбционного цикла, таковы: теплообменник-теплоутилизатор, АБХМ и градирня. Потребности в холодопро-

изводительности определяют мощность ходильной машины, которая, в свою очередь, определяет размер теплообменника и градирни.

Можно ожидать, что требования, предъявляемые к электричеству, теплу и холоду систем тригенерации будут широко варьироваться в зависимости от местоположения, размеров и т.д. Для того чтобы определить какой диапазон холодильных мощностей уместен, опыт работы с организациями, принимающими участие в данном проекте и были исследованы доступные статистические данные. Было решено использовать для этих исследований ряд из пяти холодильных мощностей, 200 кВт, 400 кВт, 600 кВт, 1000 кВт, 1400 кВт который охватывает диапазон от малых до крупных гостиниц.

В рассмотренных выше системах тригенерации предполагается, что только тепло выхлопных газов используется для питания абсорбционной холодильной машины. Это верно в случае применения газовых турбин, выхлопной газ которых используется для производства пара в котле-утилизаторе. Однако, как гласит документ «Энергосбережение тригенерационными установками в гостиничном секторе», что могут быть приняты во внимание другие решения. Они являются использующими как тепло от радиатора двигателя, так и тепло выхлопных газов для производства горячей воды, которая питает абсорбционную машину.

4. Обзор абсорбционного рынка

Во всём мире существует некоторое количество поставщиков абсорбционного холодильного оборудования и абсорбционного морозильного оборудования. Не все из них снабжают европейский рынок. Фирмы, которые производили абсорбционное оборудование в течение многих лет и являются широко известными, могут прекратить деятельность в этом направлении. Новые фирмы, возможно, недавно начали свою деятельность. Хотя наша цель состояла в том, чтобы осуществить насколько это, возможно, было неосуществимо войти в контакт со всеми производителями, которые нам известны. Кроме того, не все из соответствующие поставщиков, например, предлагают газовые АБХМ в то же самое время предлагая паровые машины или машины, работающие на горячей воде.

4.1. Бромистолитиевые машины

Нижеследующие поставщики АБХМ с рабочей парой вода - бромистый литий были определены:

- Carrier (США)
- York (США)
- Trane (США)
- McQuay (США), по лицензии Sanyo
- Yazaki (Япония), машины малой производительности
- Sanyo (Япония)
- Ebara (Япония), совместно с Carrier
- Mitsubishi Heavy Industries (Япония), which has ties with York
- Toshiba (Япония)
- Hitachi (Япония)
- Kawasaki Heavy Industries (Япония), совместно с Matsushita Electric (Япония)
- Thermax (India), бывший владелец лицензии Sanyo
- Entropic (Франция/Германия)
- LG Machinery (Корея)
- Kyung Won Century (Корея)
- Broad (Китай), только машины с газовым обогревом

Список, конечно, не является исчерпывающим. Компания Daikin (Япония) отказалась от абсорбционной тематики в 80-х, но как оказывается из последних сообщений, некоторые виды деятельности были возвращены снова. В дополнение к списку, существуют производители, которые поставляют большие изделия для промышленного использования, например, судостроительный завод Hitachi (Япония).

Большинство из абсорбционного оборудования, основанного на рабочих парах вода-бромид лития, спроектированы для нужд кондиционирования. По историческим причинам мощности приведены в американских RT (Холодильных Тонн), одна американская тонна льда за час, в литературу-

ре от производителей. Одна тонна в час соответствует примерно 3,5 кВт холодопроизводительности.

4.1.1. Одноступенчатые машины

Большинство производителей предлагают одноступенчатые холодильные машины в диапазоне от примерно 100 RT до 1500 RT, т.е. от 350 кВт до 5,2 МВт. Они могут работать на паре давлением от 135 до 205 кПа (1-2 бар (изб.), 2-3 бар), что соответствует температуре пара от 110 до 120 °С. В то же самое время они могут обогреваться горячей водой с температурой от 115 до 150 °С при максимальном давлении до 9 бар. КПД находится в диапазоне от 0,6 до 0,7.

Расход пара в одноступенчатых машинах примерно 2,3 кг/ч на кВт мощности. Расход греющей воды лежит в диапазоне от 30 до 72 кг/ч на кВт, в зависимости от допустимого перепада температур.

4.1.2. Двухступенчатые машины

Двухступенчатые машины имеют приблизительно тот же самый диапазон мощностей. Наименьшая холодопроизводительность, предлагаемая некоторыми производителями немного больше: 200 RT у одних и 350 RT у других фирм (700 и 1200 кВт соответственно). Пар считают предпочтительной средой, которой такие машины обогреваются. Давление пара должно составлять 9-10 бар(изб), 10-11 бар (абс) или 1100-1200 кПа, которое соответствует температурному диапазону от 175 до 185 °С. Согласно полученной информации, также возможно обогревать двухступенчатые машины горячей водой, температура которой должна быть в диапазоне от 155 до 205 °С. КПД таких машин от 0,9 до 1,2.

Потребление пара двухступенчатых машин составляет около 1,4 кг/ч на кВт.

5. АБСОРБЦИОННАЯ БРОМИСТОЛИТИЕВАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ МАШИНА С ОГНЕВЫМ ОБОГРЕВОМ

Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) широко распространены за рубежом и предназначены для получения холодной воды (или другой жидкости) температурой не ниже плюс 5 °С. Они производятся в таких странах, как Япония, Китай, США, Индия, Корея и др.

В России созданием абсорбционных термотрансформаторов (холодильных машин и тепловых насосов) занимается ООО «ОКБ Теплосибмаш»

В 2010 году были изготовлены и введены в эксплуатацию две АБХМ с огневом обогревом специальной конструкции¹. Машины предназначены для охлаждения минеральной воды с 30 °С до 6 °С. В качестве источника энергии используется природный газ.

Принципиальная схема АБХМ с огневом обогревом представлена на рис. 1.

Характерные особенности данной машины:

- АБХМ предназначена для использования в пищевой промышленности, а именно, минеральная вода проходит непосредственно по трубному пространству испарителя. Для этого все детали трубного пространства изготовлены из нержавеющей стали, пригодной для пищевых производств;
- В отличие от базовой модели АБХМ номинальной мощностью 1000 кВт генератор высокого давления рассчитан на максимальную холодильную нагрузку – 1570 кВт.

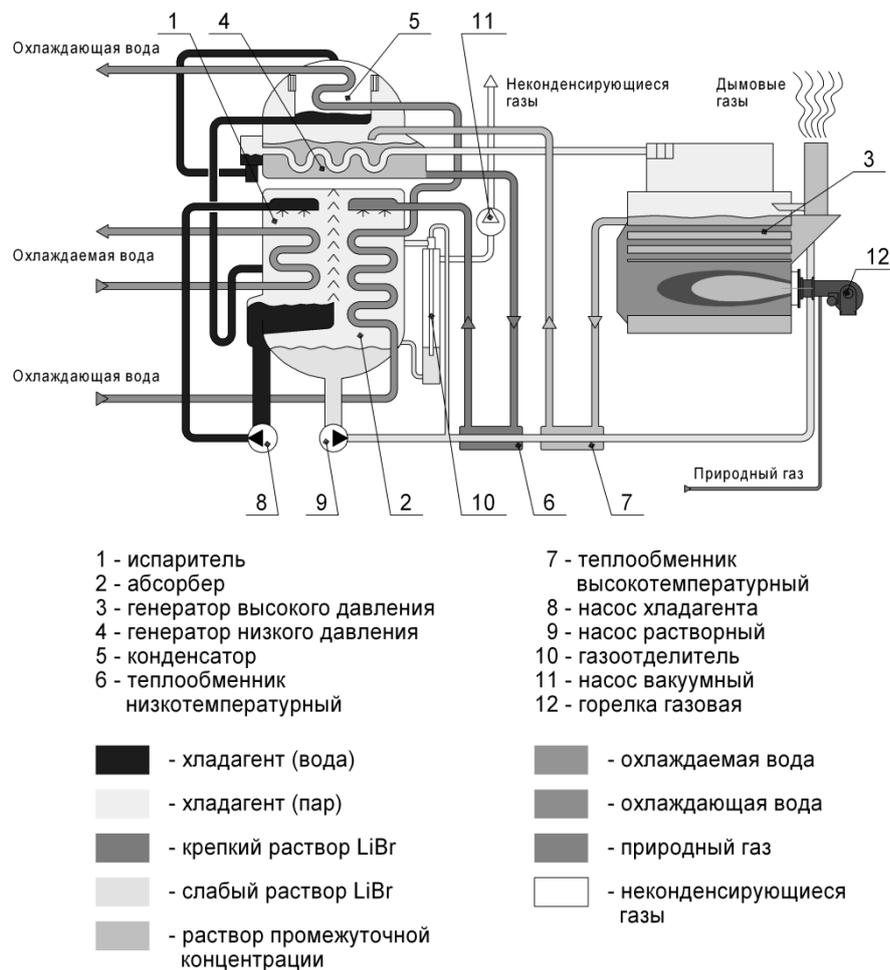


Рисунок 1 – Схема принципиальная АБХМ с огневым обогревом.

¹ Кроме серийных машин ООО «ОКБ Теплосибмаш» выпускает АБХМ специального исполнения под условия заказчика.

Все остальные аппараты заимствованы из базовой модели (1000 кВт), таким образом, была достигнута высокая степень унификации и значительно сокращен срок поставки машин заказчику.

- АБХМ рассчитана на два режима охлаждения минеральной воды: высокотемпературный «30-15 °С» и низкотемпературный «15-6 °С» (табл. 1) для охлаждения минеральной воды с 30 °С до 6 °С путем последовательного охлаждения в двух одинаковых машинах.

Таблица 1. Техническая характеристика холодильной машины АБХМ-1500Тс

Наименование параметра	Параметры номинального режима		Допустимые параметры
	Режим 30-15 °С	Режим 15-6 °С	
Холодопроизводительность, кВт	1570	940	-
Охлаждаемая вода:			
Расход, м ³ /ч	90	90	до 90
Температура на входе/ выходе, °С	30/15	15/6	10...35/не менее 5
Допускаемое давление, МПа	не более 1,0		
Гидравлическое сопротивление, м. вод. ст.	Не более 5,5		-
Охлаждающая вода:			
Расход, м ³ /ч	290	191,5	до 310
Температура на входе, °С	27		18...27
Температура на выходе из машины, °С	35		32...36

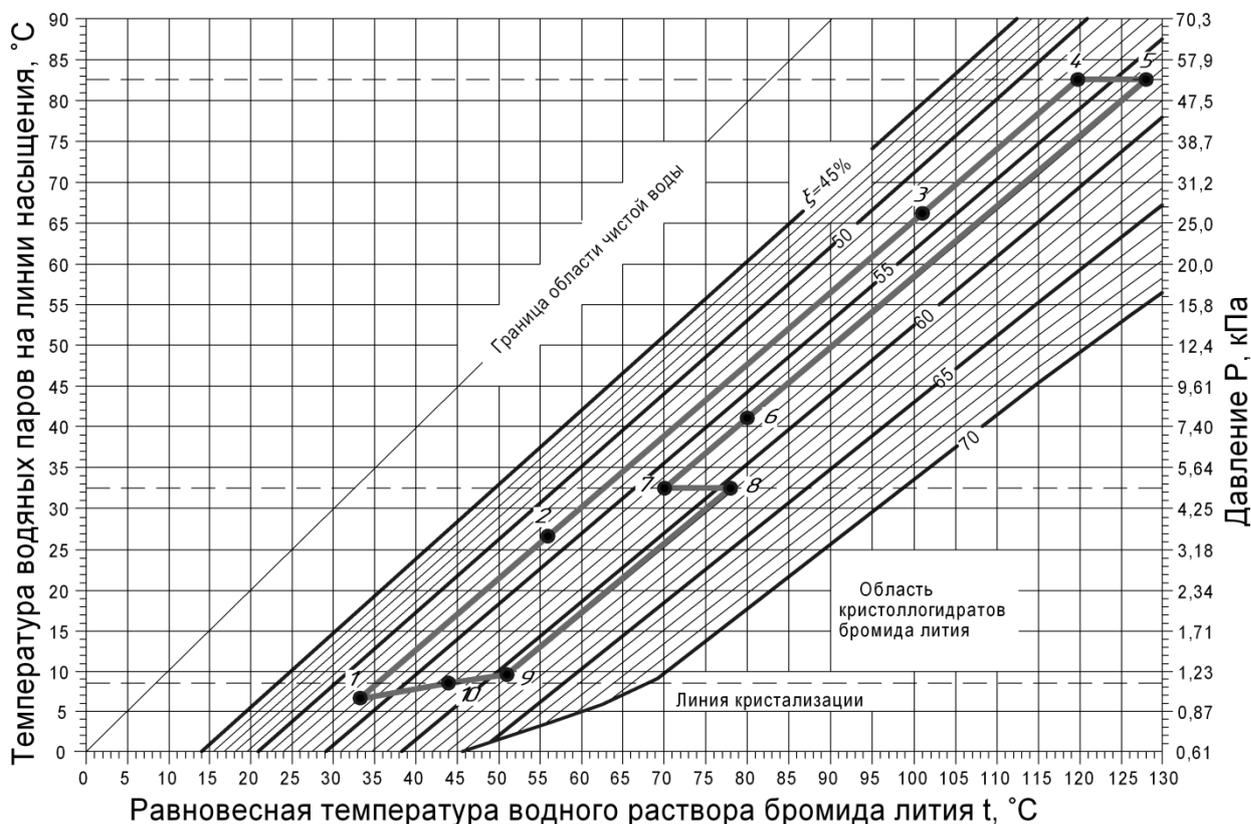
Гидравлическое сопротивление, м. вод. ст.	12	5,5	не более 14
Допускаемое давление, МПа	не более 0,6		
Природный газ:			
Расход, нм ³ /ч (калорийность: 8500 ккал/нм ³ ч):	153	92	-
Давление газа перед фильтром (после РГВД), мбар (кПа)	90...300 (9...30)		
Количество дымовых газов, м ³ /час:	1820	1100	-
Температура дымовых газов на выходе, °С	до 200		
Давление (разрежение) дымовых газов на выходе, мбар (Па)	минус 2,0 (-200)	минус 4,0...плюс 1,0 (-0,4...+0,1)	
Электропитание	380 В±5%, 50 Гц±5%		
Установленная электрическая мощность, кВт	8,5		
Габариты (длина×ширина×высота), мм	4750x3100x3100		
Масса (сухая/рабочая), кг	13500/20800*		

В ходе пусконаладочных испытаний удалось добиться устойчивых значений параметров внешних теплоносителей (табл. 2). А именно, расход и температура охлаждаемой и охлаждающей воды были стабильны в течение более половины часа.

Этого времени хватило, чтобы стабилизировались и внутренние параметры рабочих сред в АБХМ (температуры и уровни раствора и хладагента в аппаратах, давление в испарителе и конденсаторе). Благодаря этому был построен действительный цикл работы АБХМ, приведённый ниже на рис. 2.

Таблица 2. Параметры, полученные в ходе испытаний АБХМ

Холодопроизводительность, кВт	1065
Температура охлаждаемой воды на входе в машину, °С	25,6
Температура охлаждаемой воды на выходе из машины, °С	10,2
Расход охлаждаемой воды, м ³ /ч	60,0
Температура охлаждающей воды на входе в машину, °С	23,5
Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, °С	28,0
Температура охлаждающей воды на выходе из машины, °С	31,5
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	220,0
Температура дымовых газов, °С	150,5
Расход природного газа (калорийность: 8050 ккал/нм ³ ч), нм ³ /ч	99,0



- | | |
|--|---|
| 1 – Выход слабого раствора из абсорбера; | 6 – Выход промежут. раствора из ТВ; |
| 2 – Вход слабого раствора в ВТ; | 7 – Начало кипения раствора в ГН; |
| 3 – Вход слабого раствора в ГВ; | 8 – Выход крепкого раствора из ГН; |
| 4 – Начало кипения раствора в ГВ; | 9 – Выход крепкого раствора из ТН; |
| 5 – Выход промежут. раствора из ГВ; | 10 – Вход смешанного раствора в абсорбер. |

Рисунок 2 – Действительный рабочий цикл АБХМ с огневым обогревом.

Проведённый на основе пусконаладочных работ анализ работы АБХМ позволяет сделать следующие выводы:

- Безнапорная система орошения в испарителе и абсорбере является предпочтительнее системы орошения с помощью форсунок;
- Недонасыщение раствора в абсорбере относительно равновесной температуры паров в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) составляет примерно 1,5%, что объясняется:
 - дроссельными потерями в паровом пространстве блока абсорбер-испаритель;
 - содержанием неконденсирующихся газов в АБХМ.
- Впервые применённая последовательная схема подачи слабого раствора на регенерацию (десорбцию) существенно упрощает эксплуатацию АБХМ, в отличие от схемы с параллельной подачей.

Холодильная станция на базе двух АБХМ с огневым обогревом с двухступенчатой регенерацией раствора работает в составе ООО «Карачинский источник» с мая 2010.

Эксплуатирующей организацией отмечены следующие качества данного вида техники, а именно:

- простота и удобство эксплуатации;
- безопасность и бесшумность при эксплуатации;
- экологическая чистота;

- исключение утечек рабочих сред и их попадание в минеральную воду, циркулирующую в трубном пространстве испарителя АБХМ.

Холодильная станция на базе двух АБХМ с огневым обогревом позволяет экономить до 5000000 кВт*ч электроэнергии в год.

6. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА И ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ГРУППЫ

Производство искусственного холода – довольно энергоёмкий процесс. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины являются энергоэффективным классом холодильной техники, поскольку в отличие от электроиспользующих холодильных машин для их работы требуется относительно недорогое тепло греющего пара, горячей воды или сжигания природного газа.

Главным показателем эффективности работы АБХМ является КПД, который показывает количество отводимой теплоты в испарителе (мощность по холоду) при подводе единицы теплоты в генераторе. Это значение варьируется в пределах от 0,5 до 0,85.

Этот коэффициент зависит от степени рекуперации тепла в растворном теплообменнике. Поэтому правильный выбор типа теплообменника и взаимного расположения теплообменной группы – является важной задачей на стадии проектирования оборудования.

Искусственный холод требуется в разных секторах промышленности и жизнедеятельности, таких как: металлургия, химическая, нефтеперерабатывающая, пищевая промышленности, системы тригенерации, кондиционирование общественных и жилых зданий, тепличных хозяйств.

Потребности в искусственном холоде в пределах какой-либо конкретно взятой технологии могут достигать десятков мегаватт.

На сегодняшний день существует два основных вида холодильных машин для получения искусственного холода:

- электроиспользующие парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ);
- теплоиспользующие абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ), которые широко распространены во всем мире и набирают популярность в России.

Область применения АБХМ [1,3] – получение «плюсового» холода (температурой от +3°C). Установленная холодильная мощность единицы оборудования колеблется от 300 кВт до нескольких мегаватт в зависимости от производителя.

В качестве источника энергии для охлаждения в одноступенчатых АБХМ используется греющий водяной пар низкого давления 0,2-0,7 ати или горячая вода 90-120°C. В двухступенчатых машинах используется пар среднего давления 4-7 ати или топливо. Холодильные машины на топливе могут использоваться в качестве водогрейного котла для сезонной выработки тепла.

АБХМ и АБТН (рис. 1) имеют ряд положительных потребительских свойств, а в некоторых случаях и преимуществ по сравнению с ПКХМ:

- высокая эффективность;
- экологическая чистота;
- низкий уровень шума при работе;
- простоту в обслуживании;
- длительный срок службы (не менее 25 лет);
- полная автоматизация;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- незначительное потребление электроэнергии;
- в качестве энергоресурса могут использовать сбросную теплоту;
- не имеют динамических нагрузок на фундамент;
- не используют экологически опасные рабочие вещества.

Рабочим веществом (хладагентом) АБХМ является вода, абсорбентом – нелетучий и нетоксичный водный раствор соли бромистого лития. Машины не подлежат Ростехнадзору.

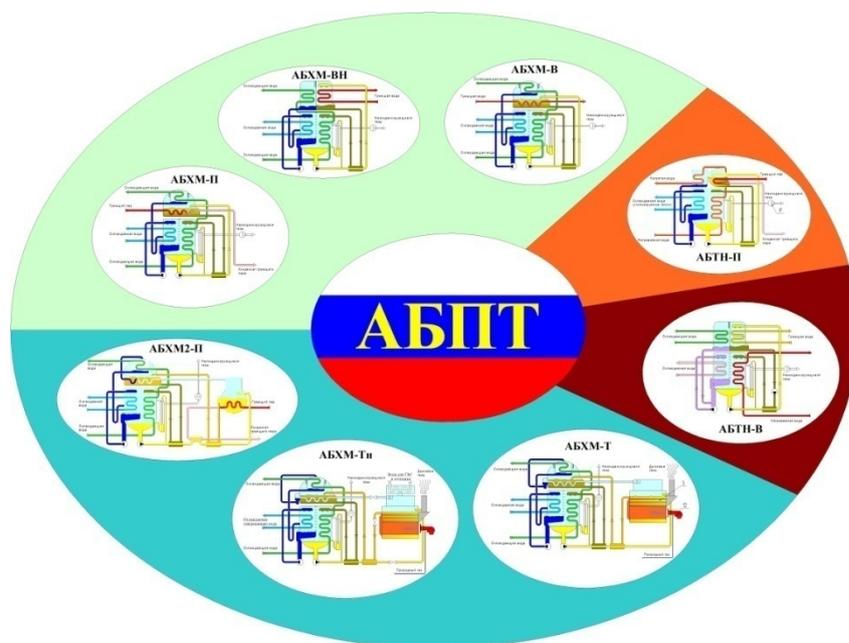


Рисунок 1 – Классификация абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты (АБПТ) российского производства.

Главным показателем эффективности работы АБХМ является КПД (в иностранной литературе COP – coefficient of performance), вычисляемый по формуле:

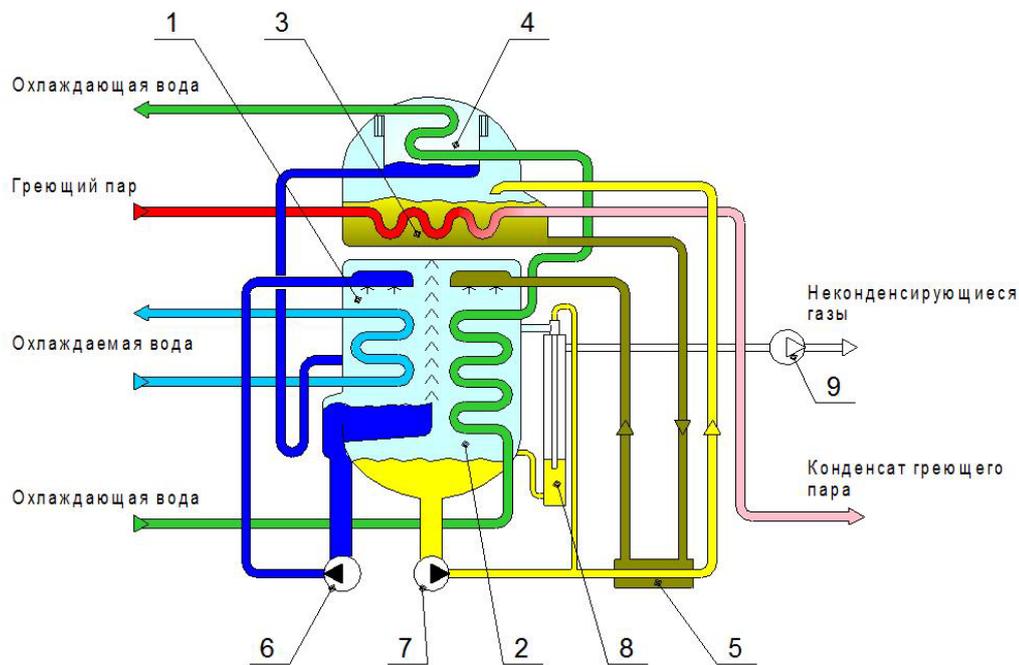
$$\eta = \frac{Q_0}{Q_h} \quad (1)$$

где Q_0 – холодопроизводительность (производительность испарителя), Вт;

Q_h – мощность в генераторе, Вт.

Иными словами, КПД показывает, какое количество теплоты можно отвести в испарителе при подводе единицы теплоты в генераторе. Это значение варьируется в пределах от 0,5 до 0,85.

Этот коэффициент отчасти зависит от соотношения параметров внешних теплоносителей (рис. 2) (охлаждаемая вода, охлаждающая вода, греющий источник), но главным образом на него влияет степень рекуперации тепла в растворном теплообменнике.



1 - испаритель
2 - абсорбер
3 - генератор
4 - конденсатор
5 - теплообменник

6 - насос хладагента
7 - насос растворный
8 - газоотделитель
9 - насос вакуумный

- хладагент (вода)

- хладагент (пар)

- крепкий раствор LiBr

- слабый раствор LiBr

- охлаждаемая вода

- охлаждающая вода

- греющий пар

- неконденсирующиеся газы

Рисунок 2 – Схема принципиальная одноступенчатой бромистолитиевой холодильной машины с паровым обогревом.

Из-за неудовлетворительной работы растворного теплообменника раствор может недоохладиться до равновесной температуры раствора в абсорбере, а это приводит к тому, что:

- увеличивается расход обратной (охлаждающей) воды;
- увеличивается величина недонасыщения раствора, что ухудшает термодинамический цикл АБХМ в целом;
- недоохлажденный раствор начинает подкипать в трубопроводе, входящем в абсорбер, образуя двухфазный поток, а это приводит к увеличению гидравлического сопротивления тракта крепкого раствора;
- увеличение гидравлического сопротивления в подводящем трубопроводе уменьшает располагаемый перепад давления в теплообменнике, а соответственно еще более ухудшает теплообмен;
- верхние ряды труб абсорбера работают впустую, охлаждая перегретый раствор.

Недогрев раствора на входе в генератор приводит к тому, что:

- увеличивается расход греющего источника;
- увеличивается величина недовыпаривания раствора, что ухудшает термодинамический цикл АБХМ в целом;
- часть поверхности генератора работает в режиме конвективного кипения, а часто и конвективного нагрева, что означает неэффективное его использование, выражающееся в перерас-

ходе дорогостоящих материалов и раствора бромида лития, заполняющего межтрубное пространство.

Выбор схемы потоков в теплообменнике

Как видно из рис. 1, количество теплообменников в АБХМ может достигать трех единиц, но в наиболее неблагоприятных условиях работает низкотемпературный теплообменник (поз. 5 на рис. 2), поэтому именно для него наиболее актуальна оптимизация.

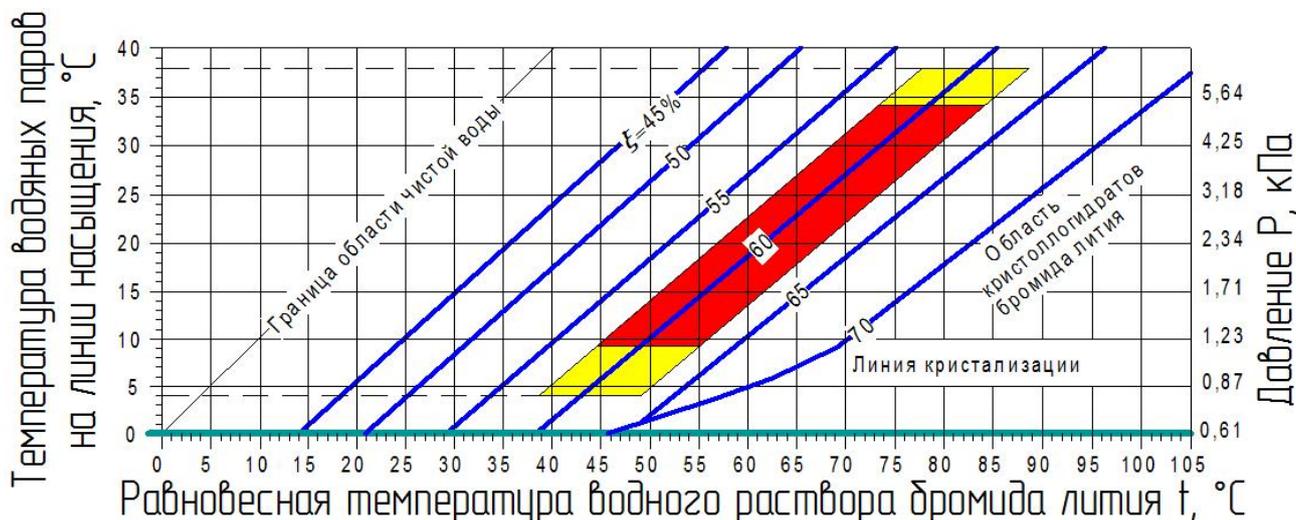


Рисунок 3 – Действительный цикл АБХМ с изображением степени рекуперации тепла в растворе в теплообменнике.

На рис. 3 видно, что раствор входит в абсорбер недоохлажденным на величину примерно 7-8 °C.

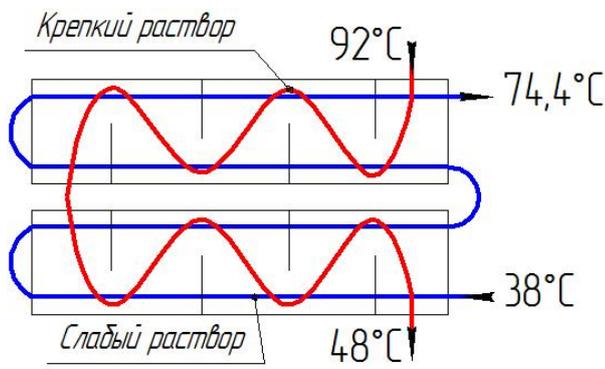
Одной из главных задач при проектировании АБХМ является подбор такого теплообменника, который мог бы охлаждать крепкий раствор бромида лития до равновесной температуры в абсорбере и ниже (переохлаждать).

Но это осложняется тем обстоятельством, что располагаемый перепад давления для развития турбулентного режима течения в межтрубном пространстве теплообменника весьма мал. А именно его максимальная величина составляет не более 15 кПа (примерно 900 мм растворного столба). Эта величина складывается из перепада давлений между абсорбером и конденсатором и перепада высот между выходом крепкого раствора из генератора и входом его в абсорбер.

В одноступенчатых АБХМ существует два пути повышения степени рекуперации теплоты в теплообменнике:

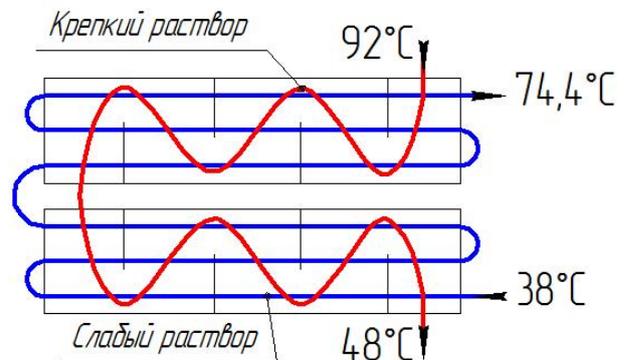
- увеличение коэффициента теплопередачи;
- увеличение площади поверхности теплообмена.

Получается двойная задача. С одной стороны коэффициент теплопередачи при поперечном обтекании выше при одинаковом гидравлическом сопротивлении с противоточной схемой, а с другой стороны поперечного обтекания можно добиться только при смешанной схеме потоков в теплообменнике. Это объясняется тем, что располагаемый перепад давления мал и количество ходов по межтрубному пространству теплообменника делают, не более трех, а, как правило – два (рис. 4).



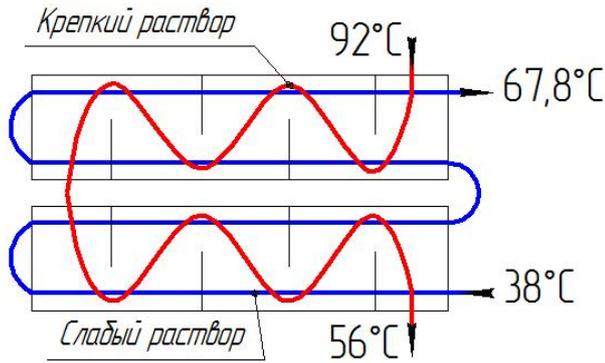
$$\epsilon_{\Delta t} = 0,5$$

а)



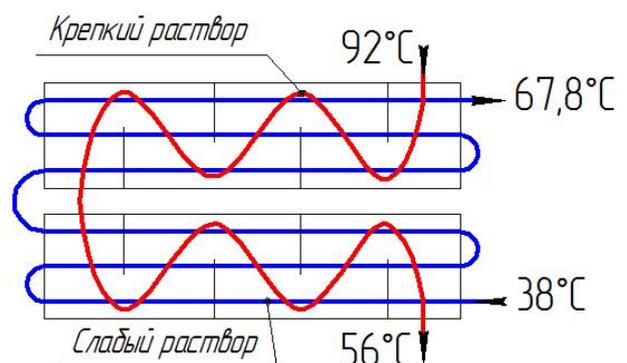
$$\epsilon_{\Delta t} = 0,55$$

б)



$$\epsilon_{\Delta t} = 0,83$$

в)



$$\epsilon_{\Delta t} = 0,87$$

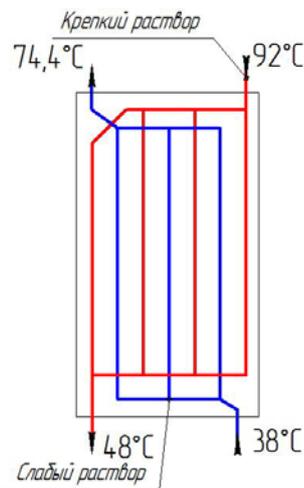
г)

Рисунок 4 – Наиболее распространенные схемы движения раствора в смешанноточных теплообменниках.

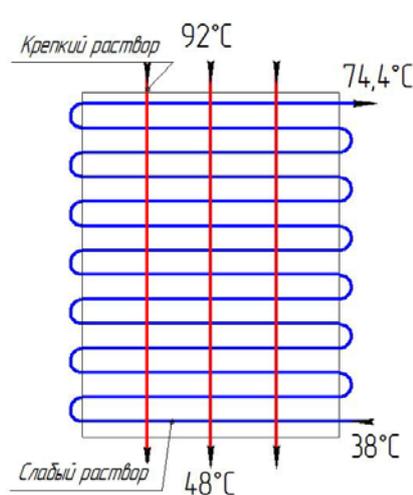
а), б) – желаемые температуры; в), г) – действительные температуры растворов.

На рис. 4а и 4б изображены схемы потоков и поправочные коэффициенты к температурному напору при желаемом режиме работы. Очевидно, что столь существенные поправочные коэффициенты к температурному напору скрадывают преимущества поперечного обтекания, а на рис. 4в и 4г – при действительном режиме работы, который связан с недостаточной рекуперацией тепла.

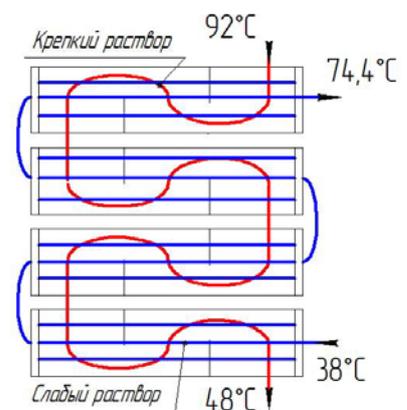
Поэтому любой теплообменник в АБХМ должен быть выполнен по противоточной схеме, либо максимально близкой к ней.



а)



б)



в)

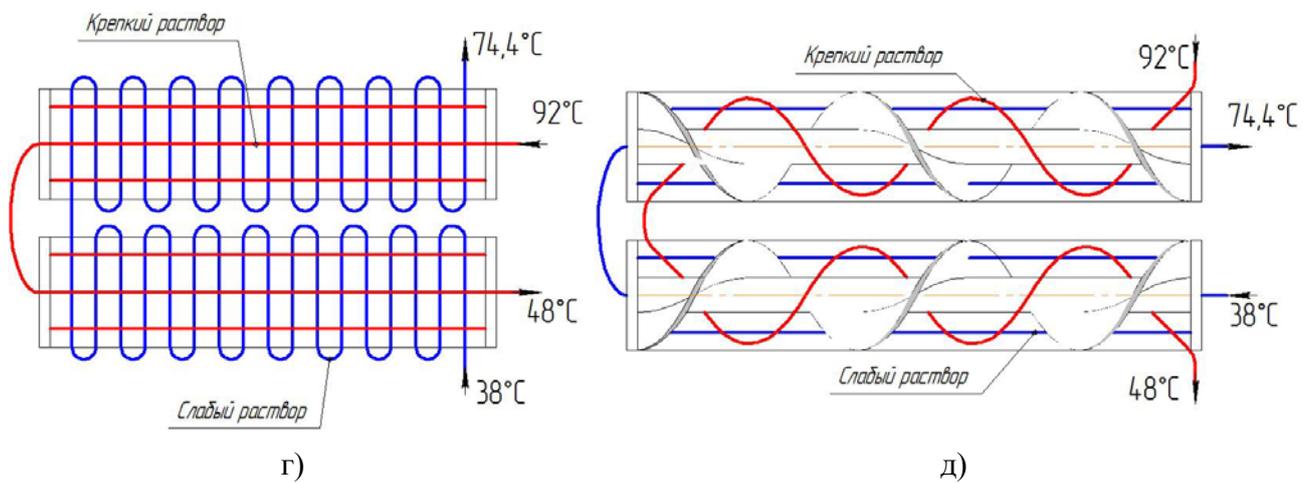


Рисунок 5 – Наиболее распространенные типы противоточных теплообменников.

- а) пластинчатый теплообменник,
- б) оросительный теплообменник;
- в) кожухотрубный теплообменник обычного исполнения;
- г) кожухотрубный теплообменник специального исполнения;
- д) теплообменник шнекового типа.

Возможные решения этой задачи изображены на рис. 5:

Не останавливаясь подробно на плюсах и минусах данных схем, можно отметить малоизученную схему с применением шнекового теплообменника и схему с применением пластинчатого теплообменника, поскольку именно в этом случае достигается максимальный коэффициент теплопередачи, и, следовательно, получается наиболее эргономичное решение, требующее минимум заправляемого раствора и используемых материалов.

Прочие схемы тоже имеют место быть и не исключают возможности применения интенсификации теплообмена.

Выбор взаимного расположения теплообменной группы

Не только материальная часть играет роль в эксплуатационной надежности АБХМ. Немаловажно правильно расположить теплообменную группу.

На рис. 6 показан путь модернизации АБХМ с двухступенчатой регенерацией раствора и паровым обогревом среднего давления. Машины такого типа применяются в частности в составе энергоблоков атомных станций [4], и снижение количества греющего пара уменьшает невыработку электроэнергии, а также снижает нагрузку на систему оборотной воды предприятия.

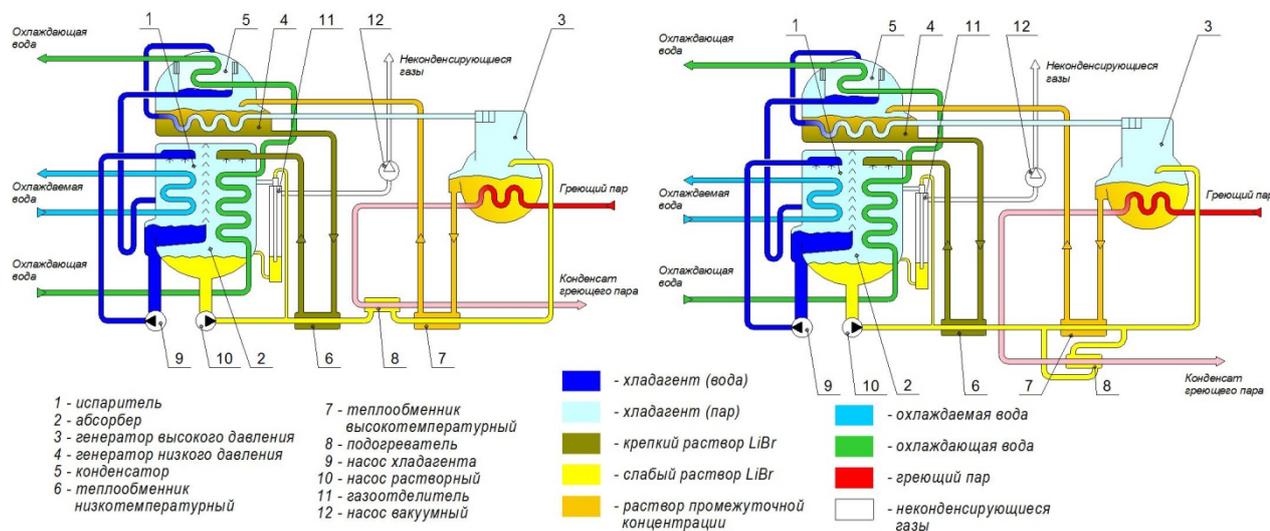


Рисунок 6 – Замена последовательной схемы расположения подогревателя на параллельную.

Изменение расположения подогревателя раствора, который предназначен для охлаждения конденсата греющего пара приводит к снижению расхода греющего пара на 3-7% (для холодильной мощности 3000кВт это примерно 200кг/час).

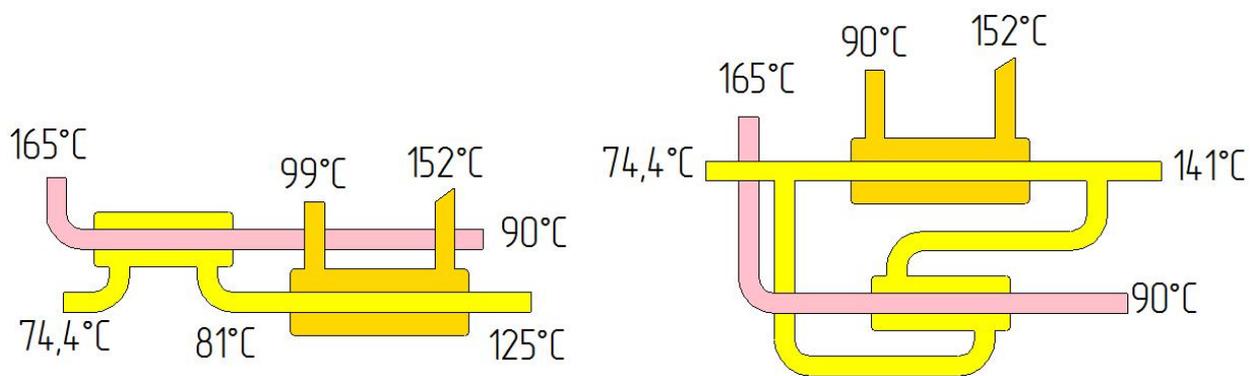


Рисунок 7 – Улучшение рекуперации тепла в высокотемпературном теплообменнике.

- а) существующее расположение теплообменника и подогревателя;
- б) перспективное расположение.

Это происходит за счет того что в высокотемпературном теплообменнике улучшается рекуперация тепла, а за счет этого уменьшается расход первичного источника, оборотной воды и более равномерно распределяется нагрузка между генератором высокого и низкого давлений.