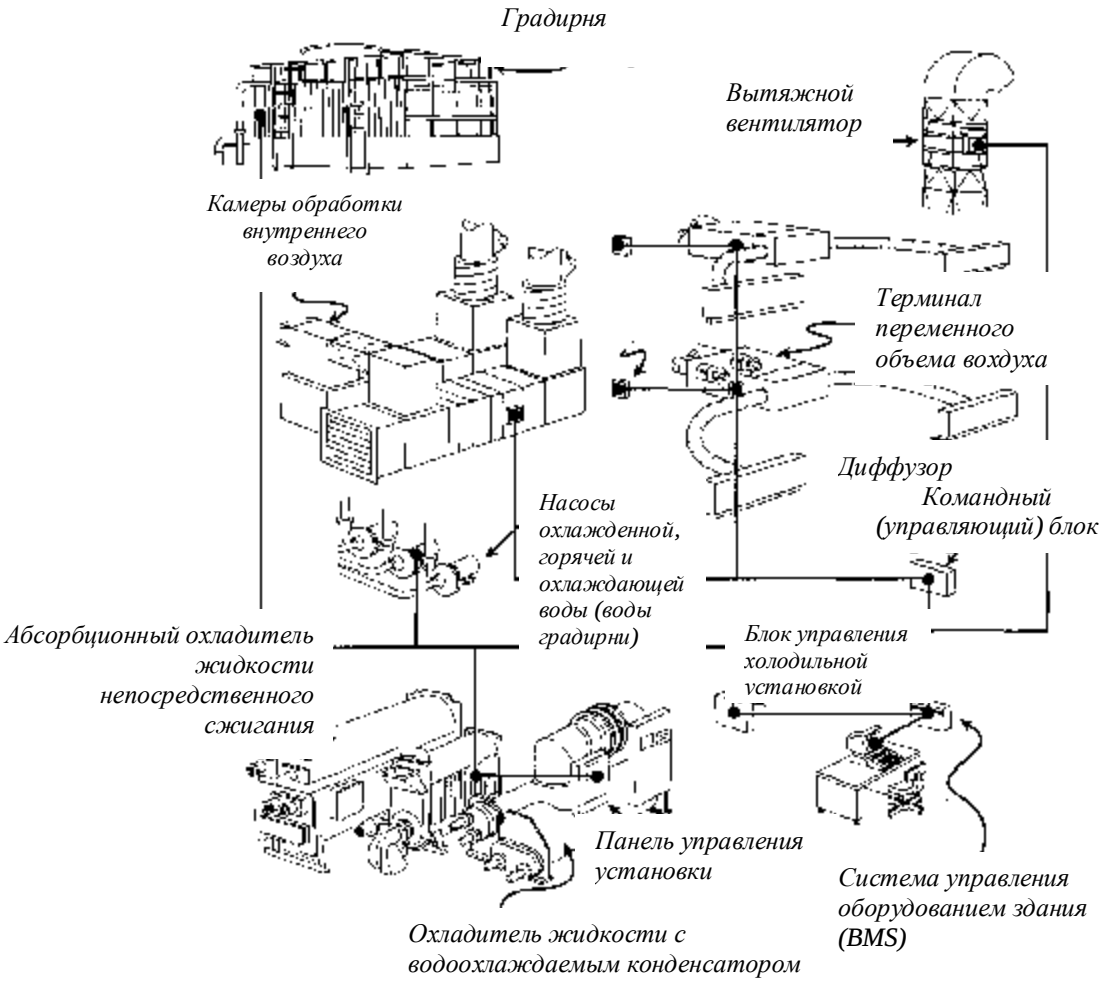
Руководство для инженеров

Система, состоящая из нескольких чиллеров
Конструкция и регулирование



SYS-APM001-EN (июль 2000)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Система, состоящая из нескольких чиллеров
Конструкция и регулирование

Майк Шведлер, специалист по применению
Энн Ятес, проектировщик

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Предисловие

В данном издании рассматриваются элементы систем по производству охлажденной воды, их конфигурация, дополнительные опции и стратегия управления этим оборудованием. Целью данного издания является ознакомление проектировщиков систем с дополнительными опциями, которые они могут использовать, чтобы более точно обеспечить выполнение пожеланий владельцев зданий. Однако данное издание не является полным руководством по проектированию систем, состоящих из нескольких чиллеров (охладителей жидкости).

Проектировщики систем могут использовать данное издание, знакомясь с основными принципами проектирования систем по производству охлажденной воды и преимуществами различных опций. В случае, когда конкретный объект может быть оптимизирован за счет примения какой-то опции, ознакомьтесь более подробно с конкретными разделами данного издания.

"Инженерные новости" (Engineers Newsletters), на которые имеются ссылки в данном издании, можно просмотреть на сайте: www.trane.com/commercial/library/newsletters.asp

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Содержание

Введение 8
Основные принципы конструкции установок охлажденной воды . . . 9
Охладитель жидкости (чиллер) 9
Нагрузка 12
Система распределения охлажденной воды 14
Система охлаждающей воды конденсатора 17
Регуляторы 18

Опции систем по производству охлажденной воды 21
Температура охлажденной воды и воды конденсатора 21
Номиналы расходов охлажденной воды и воды конденсатора 24
Неправильное понимание концепции низких номиналов расходов . . . 33

Конфигурации систем 36
Параллельное подключение нескольких чиллеров 36
Последовательное подключение нескольких чиллеров 38
Первично-вторичные (разъединенные) системы 40

Компоновки схем подключения насосов 45
Регулирование в зависимости от расхода 48
Последовательность работы чиллеров 49

Системы с переменным расходом в первичной системе 51
Премущества метода VPF 52
Предостережения для случаев использования метода VPF 53
Регулирование последовательности работы чиллеров 56

Опции регулирования температуры охлажденной воды 60
Переустановка уставки охлажденной воды - повышение и понижение . . . 60
Критичные значения при переустановке уставки охлажденной воды . . . 60

Рекомендации по проектированию 62
Возможные конфигурации схем подключения насосов охлажденной воды . . 62
Выбор типоразмера линии байпаса. 63
Количество жидкости в контуре 63
Расширение мощностей холодильной установки 64

Варианты систем охлажденной воды 66
Регенерация тепла 66
Преимущественное нагружение 66
Использование чиллеров различного тиоразмера 71
Последовательно-противоточная схема 71
Работа при параметрах, выходящих за диапазон граничных значений чиллера . 73

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Спорные вопросы при проектировании систем охлажденной воды . . 76
Синдром малого значения ΔT 76
Обратный клапан на линии байпаса 76
Устранение отказов 77
Альтернативные источники энергии 78
Непредвиденные объстоятельства 79

Варианты конденсаторных систем 82
Конфигурации схем подключения конденсатора 82
Методы регулирования вентиляторов градирни 84
Пластинчатый теплообменник 85
Артезианская вода, речная и озерная вода 85
Регулирование температуры воды конденсатора 85
Опции насосов воды конденсатора. 86
Возможности модернизации 88

Выводы 91

Словарь, используемых терминов 92

Список, использованной литературы 95

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Содержание

Рисунки

Рисунок 1	Стандарный компрессионный чиллер (охладитель жидкости) . .	9
Рисунок 2	Потребители (нагрузки), регулируемые с помощью клапанов . .	13
Рисунок 3	Теплообменник с нерегулируемым расходом воды . . .	14
Рисунок 4	Упрощенная распределительная система	16
Рисунок 5	Производительность системы охлажденной воды при неполной (частичной) нагрузке	28
Рисунок 6	Годовые эксплуатационные расходы	32
Рисунок 7	Сравнение энергопотребления систем (без трубопроводов) . .	34
Рисунок 8	Схема параллельного подключения чиллеров с одним общим насосом охлажденной воды	36
Рисунок 9	Схема параллельного подключения чиллеров с раздельными насосами	37
Рисунок 10	Последовательное подключение чиллеров	38
Рисунок 11	Схема разделенного подключения	40
Рисунок 12	Производящий контур	42
Рисунок 13	Распределительный контур	43
Рисунок 14	Схема параллельного подключения распределительных систем .	45
Рисунок 15	Компоновка схемы третичной насосной прокачки (третьей насосной системы)	46
Рисунок 16	Тройник (коллектор) подачи для разъединенной системы . .	47
Рисунок 17	Измерение температуры	49
Рисунок 18	Система с переменным расходом в первичном контуре . . .	51
Рисунок 19	Разделенная система с двумя концами	65
Рисунок 20	Параллельная схема преимущественного нагружения . . .	67
Рисунок 21	Схема преимущественного нагружения с боковым отводом . .	68
Рисунок 22	Пластинчатый теплообменник	69
Рисунок 23	Последовательно-противоточная схема	72
Рисунок 23а	Концепция равного температурного перепада	72
Рисунок 24	Величина расхода выходит за диапазон граничных значений для данного типа оборудования	73
Рисунок 25	Температура выходит за диапазон граничных значений для данного типа оборудования	74
Рисунок 26	Прецизионное регулирование температуры - система, состоящая из нескольких чиллеров	75
Рисунок 27	Устранение отказов	78
Рисунок 28	Схема трубопроводов насосов воды конденсатора, работающих на общий коллектор	83
Рисунок 29	Оптимизация работы чиллера-градирни	86
Рисунок 30	Разъединенная система циркуляции воды через конденсатор . .	87
Рисунок 31	Выбор градирни для различных производительностей чиллеров .	89

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Содержание

Таблицы

Таблица 1	Рекомендуемый перечень точек контроля чиллера согласно нормам ASHRAE 3-1996	19
Таблица 2	Номиналы стандартных условий для абсорбционных чиллеров	24
Таблица 3	Номиналы стандартных условий для систем охлажденной воды	25
Таблица 4	Условия низкого расхода для насоса охлажденной воды	26
Таблица 5	Условия низкого расхода для градирни	26
Таблица 6	Условия низкого расхода для насоса воды конденсатора	27
Таблица 7	Суммарная мощность системы	27
Таблица 8	Эффект понижения температуры воды	29
Таблица 9	Изменение производительности при модернизации	31
Таблица 10	Влияние снижение расхода	33
Таблица 11	Примеры изменений (флуктуаций) расходов	56

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Введение

Многие владельцы зданий постоянно ведут поиск решений, позволяющих сделать их бизнес более качественным, конкурентноспособным и рентабельным. Разработчики систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) часто используют системы по производству охлажденной воды для обеспечения высококачественного и эффективного по стоимости процесса кондиционирования воздуха для этих владельцев зданий. Благодаря появлению более совершенных чиллеров, а также устройств регулирования на уровне системы и программных инструментов анализа возник целый ряд специальных опций для систем по производству охлажденной воды.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Основные принципы конструкции установок охлажденной воды

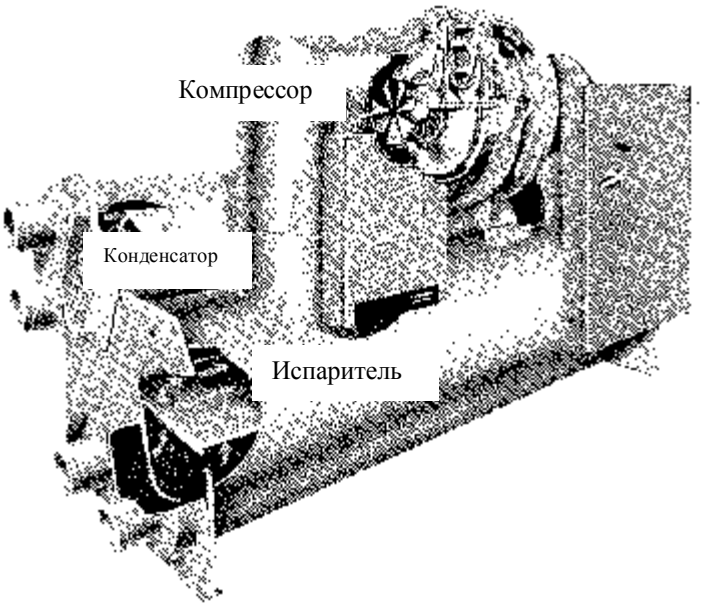
Основными функциональными элементами установок охлажденной воды являются:

• чиллеры, которые производят охлажденную воду;
• потребители (нагрузка) которые часто представляют собой теплообменники, в которых тепло воздуха забирается водой;
• насосы распределения охлажденной воды и трубопроводы, по которым охлажденная вода подается к упомянутым выше потребителям (нагрузке);
• насосы, трубопроводы и градирни воды конденсатора, которые обеспечивают теплосъем (в охладителях жидкости с водным охлаждением конденсатора);
• устройства регулирования, которые координируют работу механических элементов, образующих систему.

Охладитель жидкости (чиллер)

Существуют различные типы холодильных машин (чиллеров). Наиболее часто используются абсорбционные чиллеры, а также чиллеры с центробежными, винтовыми и спиральными (scroll) компрессорами. Имеются также холодильные машины с поршневыми компрессорами. В охладителях жидкости может использоваться как воздушное, так и водяное охлаждение конденсатора. Основными элементами чиллера, обеспечивающими сжатие паров, являются испаритель, компрессор(ы), конденсатор и расширительное устройство(а). В данном издании обсуждаются параметры работы испарителя и конденсатора и их взаимосвязь с режимом работы установки охлажденной воды.

Рисунок 1 Стандарный компрессионный чиллер (охладитель жидкости)



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Основные принципы конструкции установок охлажденной воды

Испаритель

Испарительная секция представляет собой кожухотрубный теплообменник, обеспечивающий теплообмен между хладагентом и водой. В зависимости от конструкции чиллера по трубам циркулирует или хладагент или вода.

- В кожухотрубном испарителе затопленного типа холодный, жидкий хладагент с низким давлением поступает через распределительную систему в кожух (корпус) и циркулирует в межтрубном пространстве кожуха, принимая тепло от более теплой воды, которая протекает по трубам.

- В кожухотрубном испарителе непосредственного испарения (DX) более теплая вода заполняет кожух, в то время как холодный жидкий хладагент низкого давления циркулирует в трубах.

Для каждого типа конструкции существует, так называемая, температура приближения (approach temperature), которая представляет собой разность между температурой хладагента и температурой потока воды на выходе. Температура приближения является критерием эффективности процесса теплопередачи в испарителе, который можно измерить.

Влияние температуры охлажденной воды

Если температура охлажденной воды на выходе для данного чиллера уменьшается, температура и давление хладагента должны также снизиться. И наоборот, если температура охлажденной воды на выходе возрастает, то растут также температура и давление хладагента. Когда меняется температура охлажденной воды на выходе, режим работы компрессора должен также изменяться. Эффект влияния изменения температуры охлажденной воды на выходе на энергопотребление может составлять от 1.0 до 2.2 процентов на один градус Фаренгейта (от 0.6 до 1.2 процента на один градус Цельсия). Всегда учитывается энергопотребление всей системы в целом, а не только чиллера. Важно всегда помнить, что хотя снижение температуры охлажденной воды на выходе ухудшает показатели работы чиллера, это снижение может улучшать работу насосов, так как в этом случае через систему прокачивается меньше воды. Вопросы внутренних взаимосвязей внутри системы более подробно рассмотрены в следующем разделе "Опции системы охлажденной воды".

Влияние расхода охлажденной воды

Поскольку испаритель представляет собой теплообменник, его режим работы зависит от расхода воды. Повышенный расход может приводить к возникновению высоких скоростей протока воды, эрозии, вибрациям или возникновению шума. Недостаточный расход приводит к снижению эффективности теплообмена и уменьшению производительности чиллера. Некоторые конструкторы считают, что низкие расходы могут приводить к загрязнению теплообменных поверхностей. Однако в общем случае, как отмечено в работах Вебба и Ли (Webb, Li [3]), эти опасения являются необоснованными, так как контур циркуляции охлажденной воды является замкнутой системой, что снижает вероятность поступления в

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

систему посторонних примесей, вызывающих загрязнение. Расход охлажденной воды через чиллер должен поддерживаться в диапазоне между минимальным и максимальным граничным значением. Эти граничные значения можно запросить у изготовителя.

Некоторые устройства регулирования чиллера рассчитаны на очень незначительное изменение расхода при работе машины [2]. Устройства регулирования более сложной конструкции допускают определенное изменение расхода охлажденной воды. Некоторые чиллеры рассчитаны на изменение расхода на 30 процентов в минуту и даже выше; другие чиллеры допускают изменение расхода до 2-х процентов в минуту. Важно, чтобы чиллер соответствовал условиям работы системы. Перед изменением расхода воды через испаритель свяжитесь с изготовителем, чтобы выяснить допустимую скорость изменения расхода. Более подробно вопрос изменения расхода рассмотрен в разделе "Системы с переменным расходом в первичном контуре".

Водоохлаждаемый конденсатор

Чтобы обеспечить охлаждение здания или технологического процесса, необходимо, чтобы переданное тепло было отведено. Суммарное количество тепла, которое должно быть отведено, представляет собой сумму полной нагрузки испарителя, тепла, образующегося при работе компрессора, и мощности, выделяемой при работе электродвигателя. В чиллерах герметичной конструкции, в которых электродвигатель и компрессор размещены в одном кожухе, тепло от этих нагрузок отводится в конденсаторе. В открытых чиллерах, в которых электродвигатель размещен отдельно и соединен с компрессором с помощью вала, тепло, выделяемое при работе электродвигателя, отводится непосредственно в окружающую атмосферу. Нагрузка испарителя и тепло, выделяемое при работе компрессора, отводятся в конденсаторе. Тепло, выделяемое электродвигателем, должно учитываться при расчете системы кондиционирования воздуха.

Влияние температуры охлаждающей воды конденсатора

Для заданного чиллера при росте температуры воды на выходе из конденсатора температура и давление хладагента также возрастают. И наоборот, когда температура воды на выходе конденсатора падает, уменьшаются температура и давление хладагента. Когда меняются температура и давление хладагента, режим работы компрессора должен также изменяться. Эффект влияния изменения температуры воды на выходе конденсатора на энергопотребление может составлять от 1.0 до 2.2 процентов на один градус Фаренгейта (от 0.6 до 1.2 процента на один градус Цельсия). Всегда учитывается энергопотребление всей системы в целом, а не только одного чиллера. Важно всегда помнить, что хотя рост температуры воды на выходе конденсатора ухудшает показатели работы чиллера, это оптимизирует работу насосов и градирни за счет использования уменьшенных расходов и более высокого термического перепада на градирне. Вопросы внутренних взаимосвязей внутри системы более подробно рассмотрены в разделе "Варианты конденсаторной системы".

Влияние расхода воды через конденсатор

Поскольку конденсатор представляет собой теплообменник, его режим работы зависит от расхода воды. Например, чрезмерно высокий расход может приводить к возникновению высоких скоростей протока воды, эрозии, вибрациям или возникновению шума.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Недостаточный расход приводит к снижению эффективности теплообмена и уменьшению производительности чиллера. Поэтому расход воды через конденсатор должен поддерживаться в заданных границах. Исключение представляют условия при запуске. Свяжитесь с изготовителем, чтобы узнать эти граничные значения расходов. Некоторые чиллеры допускают работу при значениях расхода, лежащих ниже заданных номиналов.

Если скорость протока воды через конденсатор в течение продолжительного времени является очень низкой и вода, используемая для охлаждения, имеет очень высокую жесткость, после продолжительной работы при таких условиях может иметь место загрязнение трубчатки. Вебб и Ли (Webb, Li [3]) исследовали состояние трубок конденсатора с внутренним оребрением при низкой скорости потока (3.51 фут/сек [1.07 м/сек] и высокой жесткости воды. Так как они обнаружили, что лишь некоторые из трубок с внутренним оребрением были покрыты отложениями, ими был сделан следующий вывод:

> " Поскольку в данных опытах использовалась вода очень высокой жесткости, проходящая через конденсатор с малой скоростью, мы не думаем, что обнаруженное загрязнение является типичным для коммерческих установок. При использовании надлежащей практики хорошего технического обслуживания и контроля качества используемой воды все проверенные трубы подходят для случаев долгосрочного использования."

Важно помнить, что чиллер, выбранный для работы при низких расходах (см. следующий раздел "Опции системы охлажденной воды"), необязательно должен иметь малую скорость протока воды через трубы. Если вопрос загрязнения труб является решающим, используйте в конденсаторе взамен труб с орерением гладкие трубы, чтобы облегчить процесс очистки.

Воздухоохлаждаемый конденсатор

В чиллерах с воздушным охлаждением конденсатора вода для охлаждения не используется, так как отвод тепла выполняется с помощью теплообменников хладагент/воздух. Для обеспечения оптимальной производительности в компрессорно-конденсаторных агрегатах с воздушным охлаждением изготовители используют ступенчатое регулирование работы вентиляторов в зависимости от нагрузки чиллера и температуры окружающего воздуха по сухому термометру.

Нагрузка

Для случаев комфортного охлаждения роль нагрузки обычно выполняют камеры обработки воздуха (установок кондиционирования воздуха), оборудованные теплообменниками, в которых тепло воздуха, отведенного из зоны кондиционирования, передается циркулирующей охлажденной воде. При этом воздух, проходя через эти охлаждающие оребренные теплообменники, охлаждается и осушается. Поскольку психрометрический процесс кондиционирования воздуха происходит именно в этих теплообменниках, выбор оптимального типоразмера и типа теплообменника (из широкого ряда выпускаемых моделей) является чрезвычайно важным для обеспечения заданной производительности системы.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

В некоторых технологических процессах на нагрузке (потребителях) не используется охлаждение воздуха. В таких ситуациях теплообмен происходит непосредственно на элементе технологического оборудования (как например, в охлаждающем кожухе машины для литья под давлением).

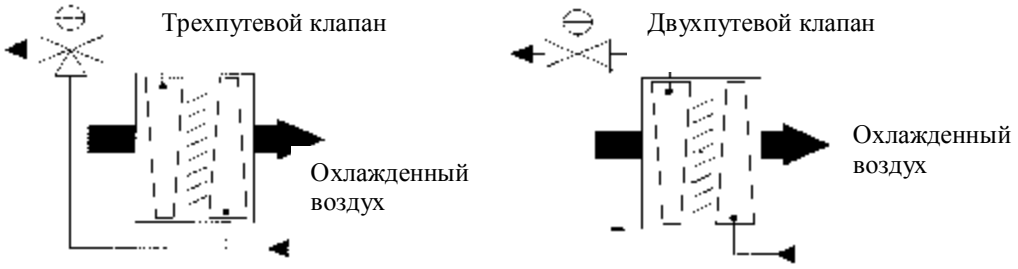
Процесс теплообмена на нагрузке может регулироваться различными методами:

- Использование трехходового (трехпутевого) клапана
- Использование двухходового (двухпутевого) клапана
- Регулирование с помощью изменения скорости прокачки
- Нерегулируемые теплообменники

Регулирование нагрузки с помощью трехпутевого клапана

Трехпутевой регулирующий клапан изменяет количество воды, проходящей через теплообменник, в зависимости от нагрузки. Клапан байпасирует неиспользуемую воду (направляет в обход теплообменника). Расход воды в системе остается постоянным и не зависит от нагрузки. В этом случае за счет расхода воды, отводимой на байпас, температура воды на выходе трехходового клапана снижается при условиях частичной (неполной) нагрузки. Это может приводить к возникновению, так называемого, "сидрома низкой дельты Т" (описание этого явления приведено в разделе "Спорные вопросы при проектировании систем по производству охлажденной воды").

Рисунок 2 Регулирование нагрузки с помощью клапанов



Регулирование нагрузки с помощью двухпутевого клапана

Двухпутевой регулирующий клапан, смонтированный на теплообменнике, выполняет такую же функцию, что и трехпутевой клапан (т.е. регулирование расхода путем дросселирования). Для теплообменника оба эти метода регулирования являются идентичными. Однако для системы охлажденной воды в целом эти методы различаются принципиально. В случае использования двухпутевого клапана дросселируется весь поток воды в контуре циркуляции теплообменника. Байпасирования воды не производится. Таким образом, система, оборудованная двухпутевым регулирующим клапаном, является системой с переменным расходом охлажденной воды. Вода на выходе теплообменника "не разбавляется" потоком байпаса при условиях частичного нагружения и температура воды на возврате системы будет выше, чем в случае использования для регулирования трехпутевого клапана.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

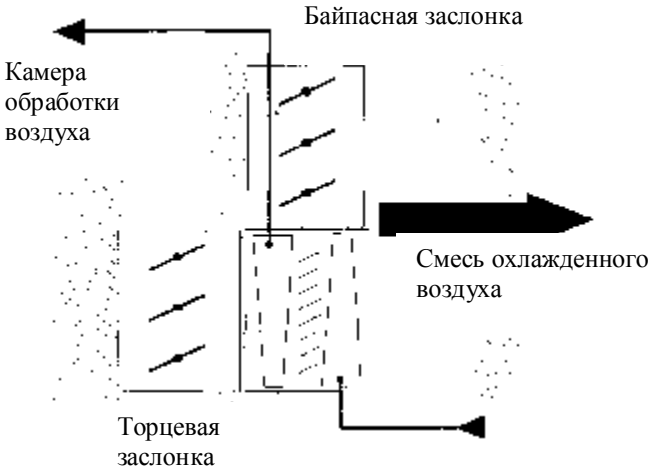
Регулирование нагрузки с помощью изменения скорости прокачки

Если каждый из теплообменников оборудован насосом, расход может регулироваться путем изменения скорости подачи насоса. Такие системы могут не иметь регулирующих клапанов на теплообменниках. Это позволяет сократить число арматуры в системе и расходы на сооружение установки.

Теплообменники с нерегулируемым расходом воды

На рисунке 3 показана схема регулирования для теплообменников, в которых отсутствует регулирование расхода воды. В таких системах регулирование ведется с помощью двух заслонок (торцевой заслонки и заслонки байпаса), с помощью которых организуется байпас части воздуха. Премуществами такой схемы регулирования являются сокращение числа регулирующих клапанов и оптимальное осушение воздуха при условиях частичной нагрузки. Недостатком такой схемы является то, что вода прокачиватся все время. Однако в системах с очень низкими перепадами давления такая схема может работать достаточно экономично.

Рисунок 3 Теплообменник с нерегулируемым расходом воды



Система распределения охлажденной воды

Охлажденная вода циркулирует по трубопроводам (обычно стальным, медным или из пластика), которые соединяют чиллер с различными терминалами нагрузки (потребителей). Размер трубопроводов выбирается таким образом, чтобы обеспечить проектные требования по значениям потерь давления, скорости воды и стоимостным показателям. Падение давление может быть компенсировано использованием насоса охлажденной воды.

Насос охлажденной воды

Насос охлажденной воды выполняет задачу обеспечения циркуляции охлажденной воды в контуре. В общем случае насос должен иметь такой напор, чтобы компенсировать потери

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

давления за счет трения в трубопроводах, теплообменниках и чиллере, а также перепад давления на регулирующих клапанах системы. Поскольку насос работает при статическом давлении системы, он не должен преодолевать это статическое давление. Например, в сорокоэтажном здании насос не должен преодолевать статическое давление, создаваемое этими 40 этажами.

Обычно насос размещается вверх по потоку от чиллера. Однако насос может быть размещен в произвольной точке системы, если выполняются следующие условия:

- Обеспечено требование соблюдения минимального позитивного подпора на всасывании (давление в системе на входе насоса должно быть положительным и иметь достаточное значение, чтобы гарантировать нормальный режим работы насоса).

- Насос должен обеспечивать поддержание минимального динамического напора на "критичных" элементах системы (обычно таким элементом является чиллер). Если динамическое давление на таких элементах будет недостаточно высоким, не сможет быть обеспечен требуемый расход через эти элементы системы.

- Насос должен быть рассчитан на суммарное давление (статический напор, плюс динамический напор) элементов системы, таких как испаритель чиллера, клапаны и т.д.

Учтите, что напор насоса передается к воде и принимается чиллером. Обычно это сопровождается незначительным ростом температуры.

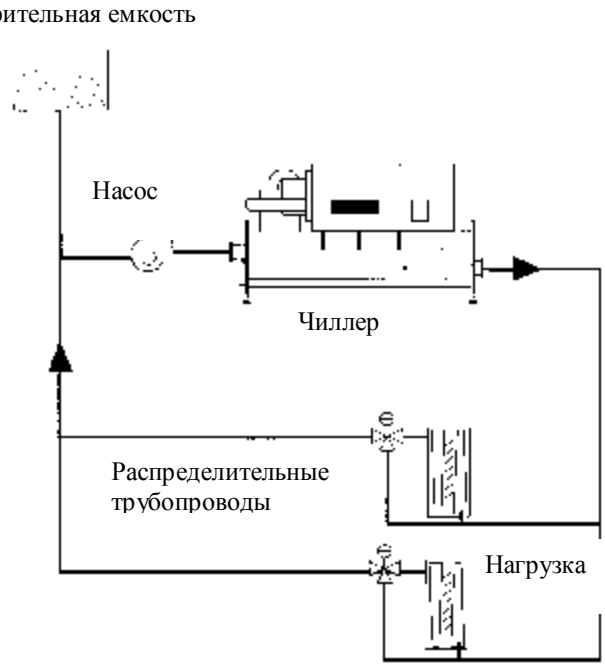
Для обеспечения резерва часто используются многосоставные насосы. В зависимости от схемы регулирования, используемой на терминале нагрузки, насосы охлажденной воды могут быть с постоянным или переменным расходом.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Схема распределительных трубопроводов

Сама по себе схема распределения охлажденной воды является достаточно простой. На рисунке 4 показана упрощенная схема системы распределения, состоящая из нескольких теплообменников охлаждения, работа каждого из которых управляется с помощью термостата, который регулирует расход через соответствующий теплообменник. Регулирующие клапаны могут быть трех- или двухпутевыми. Как было отмечено выше, использование трехпутевого клапана требует постоянного расхода воды, в то время как в схемах с использованием двухпутевых клапанов расход воды в системе изменяется. Когда расход изменяется, насос может просто работать на различных точках рабочей характеристики или должен использоваться один из методов регулирования расхода, например использование привода с переменной скоростью вращения. Более подробно опции систем распределения рассмотрены в разделе "Конфигурации систем".

Рисунок 4 Упрощенная схема распределения охлажденной воды



В состав распределительной системы могут входить и другие элементы, такие как расширительная емкость, регулирующие клапаны, уравнительные и обратные клапаны и т.д. Плотность, а следовательно объем воды в "закрытой" (замкнутой) системы распределения охлажденной воды изменяется в зависимости от температуры. Чтобы компенсировать это расширение, используется расширительная емкость.

В разделе 12 справочника "Системы и оборудование для отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха ASHRAE 2000" (HVAC Systems and Equipment Handbook) [1] представлена дополнительная информация, касающаяся элементов системы распределения охлажденной воды.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Система охлаждающей воды конденсатора

Трубопроводы систем охлаждающей воды конденсатора также, как и систем распределения охлажденной воды, обычно изготавливаются из стали, меди или пластика. Их размеры выбираются таким образом, чтобы обеспечить работу при проектном значении давления, а также гарантировать поддержание на заданном уровне следующих параметров: потери давления, скорость воды и стоимость конструкции. Потери давления в трубопроводах и конденсаторе чиллера, а также статическое давление градирни компенсируются с помощью кондесаторного насоса.

Градирня

Чтобы обеспечить отвод тепла, вода пропускается через градирню, в которой часть воды испаряется, охлаждая при этом оставшуюся часть воды. Эффективность работы градирни (эффективность процессов теплопередачи в градирне) зависит от расхода и температуры воды, а также от температуры наружного воздуха по влажному термометру. Разность между температурами воды на входе и выходе градирни определяется как "диапазон" (range). Разность между температурой воды на выходе градирни и температурой воздуха на входе по влажному термометру определяется как "температурное приближение" (approach).

Влияние нагрузки на параметры работы градирен

Если нагрузка в здании снижается (уменьшается отвод тепла) снижаются также и "диапазон" (range) и "температурное приближение" (approach). Это означает, что при снижении нагрузки по холоду в здании при той же температуре наружного воздуха по влажному термометру градирня может производить более холодную воду.

Влияние состояния наружного воздуха

Когда температура наружного воздуха по влажному термометру падает, величина "температурного приближения" (approach) (при сохранении постоянной нагрузки) растет. Этот факт должен учитываться при разработке стратегии регулирования работы градирни. Более подробное описание возникновения таких условий приводится в подразделе "Энергобаланс в градирне" (см. также раздел 36 справочника "Системы и оборудование для отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха ASHRAE 2000" (HVAC Systems and Equipment Handbook) [1]).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Регуляторы

Регулирование температуры подачи охлажденной воды обычно выполняется на чиллере. В большинстве случаев температура подачи воды является измеряемой переменной, по которой ведется регулирование производительности чиллера, чтобы обеспечить соответствие условиям нагрузки системы. Метод регулирования температуры воды на подаче может быть использован как в системах с постоянным расходом, так и в системах с переменным расходом. Как было показано выше, регулирование расхода выполняется на терминалах нагрузки с помощью трех- или двухпутевых клапанов или путем использования отдельных насосов для каждого теплообменника.

Для регулирования могут использоваться самые различные устройства, начиная от медленно действующих пневматических регуляторов и до электромеханических или наиболее совершенных цифровых регуляторов, использующих алгоритмы, наиболее точно обеспечивающие требуемую производительность.

Регулирование работы чиллера

Современные устройства регулирования чиллера позволяют выполнять значительно больше опцией, чем просто включение/выключение чиллера. Эти устройства регулирования должны, как минимум, обеспечивать выполнение мониторинга следующих параметров:

- Параметры безопасной работы, такие как температуры подшипников и электротехнические параметры, выход которых за диапазон допустимых значений может вызвать повреждение электродвигателя.

- Параметры работы, отклонение которых от заданных величин может привести к возникновению проблем с режимом, если не будут предприняты корректирующие действия. Примером таких параметров являются низкая температура охлажденной воды или низкая температура хладагента, которые могут привести к замерзанию жидкости в трубках или межтрубном пространстве испарителя.

- Общие параметры режима работы чиллера, которые должны регистрироваться каждый день, чтобы обеспечить заданную производительность чиллера.

В таблице 1 приводится рекомендуемый перечень точек контроля (в соответствии с требованиями норм ASHRAE).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Таблица 1 Рекомендуемый перечень точек контроля чиллера согласно нормам ASHRAE 3-1996

Охлажденная вода	Расход		Расход
	Давление на входе	Вода	Давление на входе
	Температура на входе	конденсатора	Температура на входе
	Давление на выходе		Давление на выходе
	Температура на выходе		Температура на выходе
Испаритель	Температурное приближение		Температурное приближение
	Давление хладагента	Конденсатор	Давление хладагента
	Температура хладагента		Температура хладагента
Масло	Уровень		Уровень
	Давление	Хладагент	Температура на нагнетании компрессора
	Температура		Дополнительные требования
	Дополнительные требования	Уровни вибраций	

Дополнительно к мониторингу параметров необходимо, чтобы устройства регулирования предупреждали операторов о возможном возникновении проблем. Диагностические сообщения необходимы оператору, чтобы соответствующим образом реагировать в ситуациях срабатывания систем защиты и когда параметры работы выходят за диапазон стандартных рабочих значений.

В то время как диагностические сообщения являются обязательным требованиями, некоторые чиллеры дополнительно к этому оснащаются специальным программным обеспечением, которое устанавливается на заводе изготовителе. Это программное обеспечение "реагирует" на диагностические сообщения. Например, когда температура охлажденной воды приближается к точке замерзания, чиллер посылает диагностическое сообщение и "реагирует" на это сообщение путем снижения производительности компрессора, что позволяет увеличить температуру охлажденной воды до безопасных значений.

Кроме того регуляторы чиллера должны взаимодействовать с контроллером системного уровня. Существует ряд параметров, которые выходят за сферу непосредственного управления регулятора чиллера, такие как, например, температура воды конденсатора, расход жидкости через испаритель и конденсатор. Чтобы минимизировать эксплуатационные затраты системы (стоимость потребляемой энергии), контроллеры системного уровня должны координировать работу чиллера, насоса, градирини и устройств регулирования терминальных установок. Это может быть сделано только в том случае, если соответствующая информация передается от каждого элемента системы к контроллерам системного уровня.

Регулирование работы насоса

В так называемых системах с постоянным расходом, насосы могут быть или включены или выключены. Когда насосы находятся в состоянии "включено", обеспечивается относительно постоянный расход. На практике же наблюдаются некоторые изменения расхода, обусловленные изменениями перепадов давления. В системах с переменным расходом регулирование работы насоса наиболее часто выполняется путем поддержания заданного перепада давления в выбранных точках системы. Например, привод с переменной скоростью вращения будет увеличивать скорость оборотов, если измеренный перепад давления становится слишком низким, или наоборот, привод будет вращаться с более низкой

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

скоростью, если перепад давления становится слишком высоким. Точка регулирования выбирается таким образом, чтобы минимизировать рост давления в системе и обеспечить требуемый расход при всех "критичных" значениях нагрузки. Оптимальные методы регулирования работы насоса рассмотрены в разделе "Переустановка критичных значений".

Литературые ссылки

1 2000 *ASHRAE HVAC Systems and Equipment Handbook,* Chapter 12, Hydronic Heating and Cooling System Design and Chapter 36, Cooling Towers, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

2 Schwedler, M., PE and Bradley, B.; "An Idea for Chilled-Water Plants Who; Time Has Come...Variable-Primary-Flow Systems',' *Engineers Newsletter.* Volume 28, No. 3, The Trane Company, 1999.

3 Webb, R.L. and Li, W.; "Fouling in Enhanced Tubes Using Cooling Tower Water, Part I: Long-Term Fouling *Data", International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2000.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Опции систем по производству охлажденной воды

Существует значительное число возможностей (опций) проектирования систем охлажденной воды. В общем случае, каждая опция является функцией номиналов расхода, температуры, типа конфигурации системы и метода регулирования. В данном разделе обсуждается влияние номиналов расхода и температуры на принятие проектных решений.

Важно помнить, что номиналы расхода и температуры являются переменными величинами. При правильном выборе этих величин установка по производству охлажденной воды может быть спроектирована таким образом, чтобы одновременно удоволетворялись требования, предъявляемые к производству охлажденной воды, и эксплуатационные затраты находились на эффективном уровне.

Проектирование систем охлажденной воды по номиналам расхода и температур часто выполняется на основе стандартов тестирования, разработанных Институтом кондиционирования воздуха и промышленного охлаждения (Air-Conditioning and Refrigeration Institute) (ARI) для компрессионных чиллеров (нормы ARI 550/590-1998 [1]) и абсорбционных чиллеров (нормы ARI 560-1992 [2]). В этих нормах содержатся требования к выполнению тестирования и выбору номиналов работы чиллеров для условий систем, состоящих из нескольких чиллеров. Нормы не предназначены для выдачи точных или оптимальных значений номиналов расходов или перепадов температур для конкретной системы. Действительно, поскольку эффективность режима работы компонентов и требования заказчика изменяются, эти стандартные номиналы условий редко являются оптимальными значениями для реальных систем. При задании номиналов расходов, температур и перепадов температур существует широкая свобода выбора.

Дополнительная информация по этому вопросу приведена в стандарте ARI 550/590-1998 - "Нормы на агрегаты охлаждения воды (Water Chilling Packages), использующих циклы сжатия паров" и в стандарте ARI 560-1992 - "Нормы на водяные чиллеры и водонагревательные агрегаты". Оба стандарта выпущены Институтом кондиционирования воздуха и промышленного охлаждения (Air-Conditioning and Refrigeration Institute) (ARI) (см. сайт www.ari.org).

Температура охлажденной воды и воды конденсатора

Выбор температуры охлажденной воды на выходе и температуры воды на входе конденсатора может быть выполнен независимо от выбора соответствующих расходов. Однако, чтобы спроектировать эффективно работающую и гибкую систему охлажденной воды номиналы температур и расходов должны подбираться с учетом их взаимосвязей.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Стандартные номиналы температур

В соответствии с нормами ARI 550/590 [1] и ARI 560 [2] стандартные номиналы температур равны:

- температура воды на выходе испарителя: 44°F [6.7°C];
- конденсатор с водяным охлаждением; температура воды на входе: 85°F [29.4°C];
- конденсатор с воздушным охлаждением; температура воздуха на входе по сухому термометру: 95°F [35.0°C]

В течение многих лет эти значения температур были реперными при проектировании систем. На сегодняшний день проектировщики используют множество различных температур.
Эта тенденция нашла свое отражение в нормах ARI 550/590 в том, что нормы допускают задание температур охлажденной воды и воды конденсатора в нестандартных точках, однако тестирование чиллера должно быть выполнено в соответствии с требованиями стандарта.

Температуры охлажденной воды

В настоящее время системы комфортного охлаждения проектируются на температуры подачи охлажденной воды, лежащие в диапазоне от 44°F [6.7°C] до 38°F [3.3°C], а в некоторых случаях и до 34°F [1.1°C].

Некоторые чиллеры, оборудованные испарителем усовершенствованной конструкции и использующие более сложные методы регулирования, могут работать при температуре охлажденной воды, равной 34°F [1.1°C] (без использования антифриза).

Следующие причины обуславливают целесообразность снижения температуры охлажденной воды:

- В случае использования более низких температур охлажденной воды система может "приспосабливаться" к более широким дифференциалам температуры (более низким номиналам расходов), чем при стандартных условиях (см. раздел "Выбор номиналов расхода").

- Более низкие значения температур воды позволяют задавать более низкие значения температур воздуха, следствием чего является снижение капитальных затрат и эксплуатационных расходов по воздушной стороне.

- Более холодная вода в том же самом теплообменнике охлажденной воды может обеспечить лучшее осушение воздуха.

- Более холодная вода может быть использована для увеличения производительности существующей системы распределения охлажденной воды. Например, это может съэкономить значительные капиталовлажения при увеличении производительности крупных централизованных установок, которые достигли граничных значений по расходам.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Некоторые разработчики сомневаются в целесообразности применения более низких температур охлажденной воды по следующим причинам:

• Чиллер начинает работать с меньшей эффективностью. Как было показано выше, снижение температуры охлажденной воды делает режим работы чиллера более тяжелым. Однако, хотя снижение температуры воды приводит к росту энергопотребления чиллера, но уменьшение расхода охлажденной воды позволяет сократить потребление энергии на работу насосов. Вследствие этого часто можно сократить энергопотребление всей системы в целом.

• Снижение температуры охлажденной воды может потребовать использования дополнительной теплоизоляции трубопроводов, чтобы исключить конденсацию (эффект "запотевания"). Обеспечьте, чтобы трубопроводы были теплоизолированы для работы при всех температурах воды. Однако снижение температуры охлажденной воды не всегда требует использования дополнительной теплоизоляции трубопроводов.

Температуры воды конденсатора

Современные чиллеры могут работать при различных температурах воды на входе конденсатора, изменяющихся в диапазоне от проектного значения температуры до значения, минимально допустимого для данной конструкции чиллера. Однако многие из существующих чиллеров старшего поколения имеют ограничения по температуре воды конденсатора. Чтобы узнать эти ограничения, свяжитесь с изготовителем чиллера. Оптимальные методы регулирования температуры воды конденсатора изложены в разделе "Варианты конденсаторных систем".

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Номиналы расходов охлажденной воды и воды конденсатора

Возможность выбора номинала расходов охлажденной воды и воды конденсатора является мощным инструментом, имеющимся в распоряжении проектировщиков. Келли и Чен (Kelly, Chan) [5], а также Шведлер и Нордин (Schwedler, Nordeen) [6] показали, что снижение величин расходов позволяет сократить стоимость монтажа и/или эксплуатации систем охлажденной воды.

Стандартные номиналы расходов

В соответствии с нормами ARI 550/590 [1] и ARI 560 [2] стандартные номиналы расходов равны:

- расход через испаритель = 2.4 (гал/мин)/тонну [0.043 (л/сек)/кВт];
- расход через конденсатор = 3.0 (гал/мин)/тонну [0.054 (л/сек)/кВт]

Указанный расход через испаритель соответствует перепаду (дифференциалу) температур, равному 10°F [5.6°C].
В зависимости от эффективности компрессора соответствующий перепад (дифференциал) температур на конденсаторе составляет от 9.1 °F до 10°F [от 5.1°C до 5.6°C].

Номиналы расходов абсорбцинных чиллеров определяются стандартом ARI 560-1992 "Нормы на водяные чиллеры и водонагревательные агрегаты"[2]. Номинал расхода через испаритель остается таким же, как и в нормах ARI 550/590, однако расход конденсаторной воды (часто называется охлаждающей водой) меняется в зависимости от конструкции абсорбционного чиллера. В таблице 2 указаны нормированные значения расходов воды через конденсатор для различных типов абсорционных чиллеров.

Таблица 2 Номиналы стандартных условий для абсорбционных чиллров

Тип абсорбционного чиллера		Номинал расхода через конденсатор (гал/мин)/тонну	(л/сек)/кВт
Одноступенчатый		3.60	0.065
Двухступенчатый	Пар или горячая вода	4.00	0.072
	Прямого сжигания	4.50	0.081

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Выбор номиналов расхода

Чтобы выполнить сравнение производительностей (декларируемых изготовителем) при точно заданных условиях, проектировщики могут использовать стандартные номиналы условий (параметров) работы. Однако нормы допускают использование различных номиналов расхода и выполнение сертифицированного сравнения для этих условий. Если при определенной нагрузке расход снижается, это сопровождается ростом температурного перепада (дифференциала). В таблице 3 приводится анализ системы охлажденной воды производительностью 450 тонн [1580 кВт охлаждения] для случая базовых условий и для случая низкого расхода.

Таблица 3 Номиналы стандартных условий для систем охлажденной воды

Система охлажденной воды		Базовые условия	Низкий расход
Расход через испаритель, гал/мин [л/сек]		1080 [68.1]	675 [42.6]
Температура охлажденной воды, °F [°C]	На входе	54.0 [12.2]	57.0 [13.9]
	На выходе	44.0 [6.7]	41.0 [5.0]
Расход через конденсатор, гал/мин [л/сек]		1350 [85.2]	900 [56.8]
Температура охлаждающей воды, °F [°C]	На входе	85.0 [29.4]	85.0 [29.4]
	На выходе	94.3 [34.6]	99.1 [37.3]
Мощность чиллера, кВт		256.0	292.0

Данный пример показывает, что температура охлажденной воды на выходе снижается, а температура воды на выходе конденсатора увеличивается. Это означает, что компрессор чиллера должен обеспечить большую мощность и использовать больше энергии. Как это повлияет на энергопотребление всей системы в целом?

Оценим энергопотребление системы для следующих условий:

- перепад давления в трубопроводах охлажденной воды = 80 футов воды[239 кПа]
- перепад давления в трубопроводах конденсаторной воды = 30 футов воды[89.7 кПа]
- проектное значение температуры воздуха по влажному термометру = 78°F [25.6°C]
- эффективность работы электродвигателей насосов и градирни = 93%
- эффективность работы насоса = 75%
- в контурах охлажденной и конденсаторной воды использован идентичный типоразмер труб (или проектное решение, или изменение расходов в существующей системе).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Перепад давления на чиллере изменится. Если использованы трубы одинакового типоразмера, то перепад давления изменяется по квадратичной функции в зависимости от величины расхода. Это утверждение справедливо только для прямолинейных учатков трубопроводов. Функция изменения перепада давления в зависимости от расхода на регулирующих клапанах или отводах к нагрузке имеет другой вид.

Необходимо рассчитать реальный перепад давления в системе. Хазен-Вильямс (Hazen-Williams) и Дарси-Вайсбах (Darcy-Weisbach) оценивают эту зависимость как экспоненту с показателем степени, равным, соответственно 1.85 и 1.90. В примерах расчетов, приведенных ниже, использовано более консервативное значение показателя степени, равное 1.85.

$$DP2/DP1 = (\text{Расход } 2)/(\text{Расход } 1)^{1.85}$$

Таблица 4 Условия низкого расхода для насоса охлажденной воды

	Базовые условия	Низкий расход
Расход, гал/мин [л/сек]	1080 [68.1]	675 [42.6]
Перепад давления в системе, фут.в. [кПа]	80.0 [239]	33.5 [100]
Перепад давления на пучке испарителя, фут.в.[кПа]	29.7 [88.8]	12.6 [37.7]
Выходная мощность насоса, л.с. [кВт]	39.9 [29.8]	10.5 [7.80]
Потребляемая мощность насоса, кВт	32.0	8.4

Задавая различные номиналы расхода и температуры воды на входе для условий низкого расхода могут быть выбраны различные градирни:

Таблица 5 Условия низкого расхода для градирни

	Базовые условия	Низкий расход
Расход, гал/мин [л/сек]	1350 [85.2]	900 [56.8]
Статический напор, фут.в. [кПа]	19.1 [57.1]	12.6 [37.7]
Выходная мощность вентилятора градирин, л.с.[кВт]	30.0 [22.4]	20.0 [14.9]
Потребляемая мощность вентилятора градирни, кВт	24.1	16.0

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Таблица 6 Условия низкого расхода для насоса воды конденсатора

	Базовые условия	Низкий расход
Расход, гал/мин [л/сек]	1350 [85.]	900 [56.8]
Перепад давления в системе, фут.в. [кПа]	30.0 [89.7]	14.2 [42.5]
Перепад давления на пучке конденсатора, фут.в.[кПа]	19.9 [59.5]	9.6 [28.7]
Статический напор градирни, фут.в.[кПа]	19.1 [57.1]	12.6 [37.7]
Выходная мощность насоса, л.с. [кВт]	31.4 [23.4]	11.0 [8.2]
Потребляемая мощность насоса, кВт	25.2	8.8

Суммарная мощность системы определяется следующим образом:

Таблица 7 Суммарная мощность системы

Мощности элементов, кВт	Базовые условия	Низкий расход
Чиллер	256.0	292.0
Насос охлажденной воды	32.0	8.4
Конденсаторный насос	25.2	8.8
Градирня	24.1	16.0
Суммарная мощность системы охлажденной воды	337.3	325.2

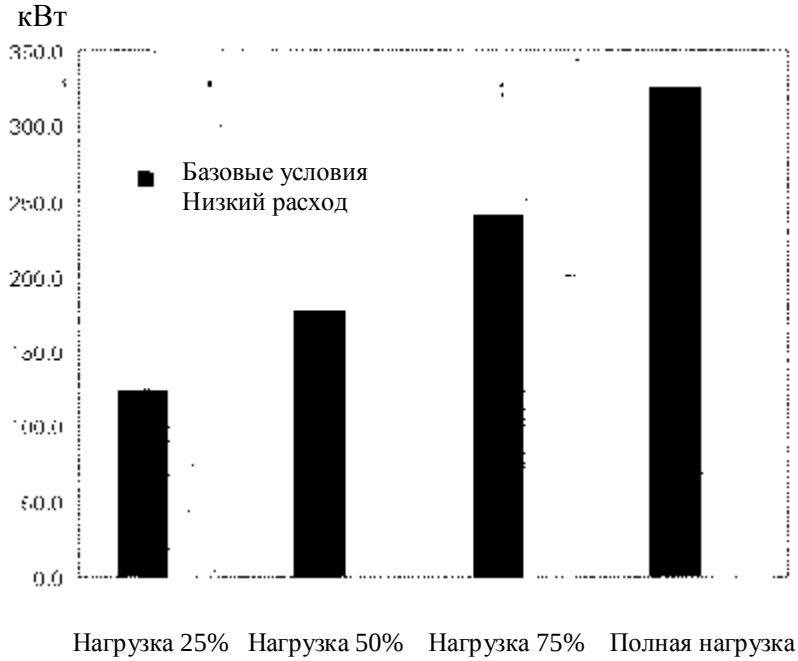
Данные этой таблицы показывают, что величина расхода может оказывать влияние на суммарную мощность системы при условии полной нагрузки. Хотя при условиях уменьшенного расхода чиллер требует большей мощности, но за счет снижения потреблемой мощности насосов и градирни в результате суммарное энергопотребление системы также уменьшается.

Что происходит при условии неполной (частичной) нагрузки? На рисунке 5 показана производительность при частичной нагрузке с учетом следующих предположений:

- насос охлажденной воды оборудован приводом с переменной частотой;
- конденсаторный насос работает при постоянной мощности;
- регулирование работы градирни ведется таким образом, чтобы получать воду с температурой ниже проектного (расчетного) значения.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 5 Производительность системы охлажденной воды при неполной (частичной) нагрузке



Хотя успешность эффекта понижения расхода зависит от типа используемого чиллера (центробежный, абсорбционный, винтовой, спиральный), для всех систем охлажденной воды правильное использование пониженных расходов дает определенные преимущества.

Изменение конструкции змеевика (теплообменника) для условий понижения температуры воды на входе

Змеевик представляет собой простейший теплообменник. Если мы хотим получить одинаковое значение производительности по явному и скрытому теплу, подавая в теплообменник более холодную воду, регуляторы теплообменника должны уменьшить количество воды, пропускаемой через этот теплообменник. Когда количество воды, проходящей через теплообменник, уменьшается, а величина передаваемого в теплообменнике тепла остается постоянной, температура воды на выходе увеличивается. Поэтому путем производства более холодной воды системы с низким расходом могут использоваться для существующих зданий. При модернизации систем рекомендуется заново выбрать теплообменник с помощью программы подбора, разработанной изготовителем, для "новой" температуры охлажденной воды, чтобы обеспечить требуемую производительность, соответствующую заданным условиям.

Если возможность получить данные по производительностям теплообменника от изготовителя отсутствует, некоторые проектировщики используют следующее приближение: на каждые 1°F-1.5°F [0.6°C-1.1°C] снижения температуры воды на входе теплообменника, температура воды на возврате возрастает на 1°F [0.6°C], обеспечивая при этом приблизительно одинаковые значения полной производительности и производительности по явному теплу.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рассмотрим, например, теплообменник, работающий при температуре воды на входе, равной 44°F [6.7°C] и температуре воды на выходе, равной 54°F [12.2°C]. При снижении температуры воды на входе до 41°F [5°C], температура воды на выходе теплообменника будет составлять около 56°F-57°F [13.3°C-13.9°C]. Этот пример показан в таблице ниже.

Таблица 8 Эффект понижения температуры воды

		Оригинальное значение °F [°C]		Снижение температуры охлажденной воды на 1° увеличения роста температуры воды на возврате, °F [°C]		
Температура воды в теплообменнике	Вход	44[6.7]	1°	41[5.0]	1.5°	41[5.0]
	Выход	54[12.2]		57[13.9]		56[13.3]

В случае использования воды с низкой температурой на подаче единственное беспокойство вызывает способность клапана правильно регулировать расход при условиях низких нагрузок. Правильно подобранный клапан хорошо может работать и в условиях систем с малым расходом. Если клапан не может нормально работать в условиях нового диапазона расходов, возможно, необходимо выполнить его замену. Однако замены теплообменника в этом случае не требуется.

Опции градирен, работающих при низком расходе

Градирня меньшего типоразмера

Также как и змеевик, градирня представляет собой теплообменник, хотя часто это приводит к неправильному пониманию. В градирне имеет место теплообмен между поступающей теплой водой и окружащей средой. Использование концепции низкого расхода для новой системы или при замене градирни позволяет выбрать градирню меньшего типоразмера с более высокой эффективностью. За счет чего это становится возможным?

Так как количество отводимого тепла является приблизительно равным в системах, работающих при стандартных условиях, и в системах с низким расходом, мы можем определить величину теплообменной поверхности, необходимую для обеспечению отвода тепла:

$$Q = UA1\ \Delta T = U\ A2\ \Delta T2 \text{ или } A1\Delta T1 = A2\ \Delta T2$$

где A= поверхность; U= коэффициент теплопередачи; ΔT = разность температур

Для стандартных условий разность температур между температурой воды на входе в градирню и температурой наружного воздуха по влажному термометру ΔT1 равна:

$$\Delta T1 = 94.2 - 78 = 16.2°F\ [34.6 - 25.6 = 9.0°C]$$

Для систем с низким расходом величина ΔT2 обычно равна:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$\Delta T2$ = 99.1 - 78 = 21.1°F [37.3 - 25.6 = 11.7°C]

Поэтому: A1 x 16.2 = A2 x 21.1 или A2 = 0.77 A1

Производительность градирни может быть изменена или путем изменения поверхности теплообмена или путем изменения расхода воздуха или путем комбинации этих двух методов. Программы выбора, разработанные изготовителем, позволяют точно определить типоразмер и мощность. В примере, показанном в разделе "Выбор номинала расхода" использовалось снижение обоих параметров: типоразмера градирни и расхода воздуха (т.е. снижение мощности вентилятора).

Типоразмер градирни остается без изменения, но используется меньшее значение температурного приближения (approach)

Другим способом является использование градирни такого же типоразмера, но при более низких номиналах расходов. Во вновь проектируемых системах такое решение принимается на уровне разработки проекта, а в уже существующих системах это часто является принудительным решением. Предполагая, что нагрузка по теплосъему остается той же самой, система с более низким расходом позволяет получить более холодную воду на возврате от градирни. Поэтому величина температурного приближения (approach) градирни к температуре наружного воздуха по влажному термометру уменьшается. В рассмотренном выше примере системы охлажденной воды с производительностью 450 тонн [1580 кВт охлаждения] та же самая градирня позволяет получить температуру воды на входе конденсатора, равную 83.5°F [28.6°C] вместо 85°F [29.4°C] для градирни меньшего типоразмера. Важно понять, что температура воды на входе в градирню будет приблизительно равна 97.6°F [36.4°C]. Поэтому эффект влияния снижения расхода на энергопотребление чиллера частично компенсируется понижением температуры воды на входе в конденсатор.

Типоразмер градирни остается без изменения, но используется чиллер большего типоразмера

Многих владельцев зданий привлекает при выполнении модернизации опция использования чиллера большего типоразмера для уже существующих градирни, конденсаторного насоса и трубопроводов воды конденсатора. Во многих случаях это позволяет владельцем зданий увеличить производительность системы охлажденной воды при наличии ограниченных средств. В таблице 9 показан пример замены существующего чиллера производительностью 450 тонн (1580 кВт) чиллером с производительностью 675 тонн (2370 кВт). Производительность возрастает в этом случае на 50 процентов. Более подробно этот пример обсуждается в следующем разделе ("Конфигурации системы"). Важно выбрать новый чиллер, исходя из новых условий работы.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Таблица 9 Изменение производительности при модернизации

		Существующая установка	Модернизация
Производительность, тонны [кВт]		450 [1580]	675 [2370]
Градирня	Расход, гал/мин [л/сек]	1350 [85.2]	1350 [85.2]
	Температура на входе, °F [°C]	94.3 [34.6]	103 [39.4]
	Температура на выходе,°F [°C]	85 [29.4]	88 [31.1]
Температура наружного воздуха по влажному термометру, °F [°C]		78 [25.6]	78 [25.6]

Расчет затрат

Только за счет снижения номиналов расхода охлажденной или конденсаторной воды возможно снижение следующих капитальных затрат:

- Снижение стоимости за счет уменьшение типоразмеров насоса, вентилей, фильтров очистки воды, фитингов и электроподключений.
- В новых системах стоимость уменьшается за счет снижения типоразмеров трубопроводов.
- В существующих системах для уже смонтированных трубопроводов охлажденной воды может быть получена большая производительность.
- Снижение стоимости за счет уменьшения типоразмера градирни, уменьшения площади, необходимой для размещения и мощности вентилятора.

При определении типоразмеров элементов вновь сооружаемых систем необходимо помнить, что при уменьшении типоразмеров трубопроводов уменьшаются также размеры вентилей и их стоимость. Однако учитывайте, что уменьшение типоразмеров труб приводит к росту перепада давления. Находите оптимум между первоначальной стоимостью (капитальными затратами) и эксплуатационными расходами.
Затраты на модернизацию могут быть существенно снижены за счет использования существующих трубопроводов.

Кроме того при использовании низкого расхода может быть выбрана градирня с меньшими габаритными размерами. Уменьшение площади для размещения может быть выгодно использовано владельцами зданий следующим образом:

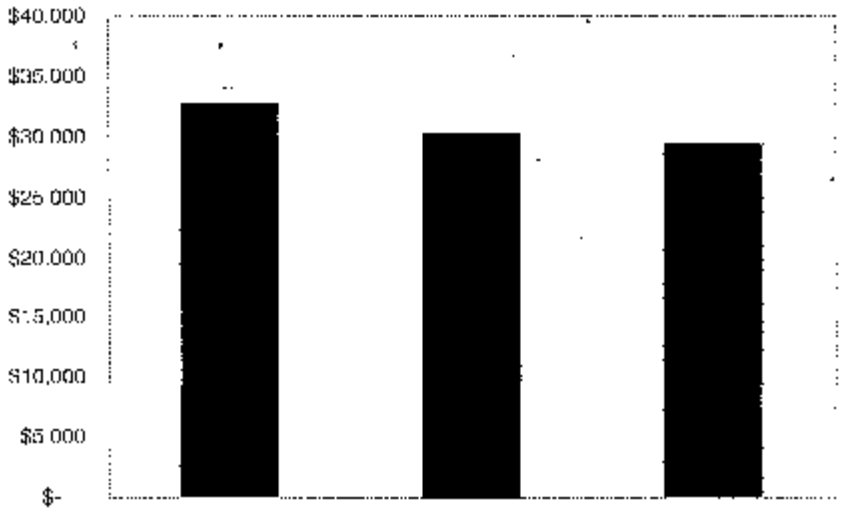
- снижаются требования к недвижимости (часто этот факт недооценивается);

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

• снижаются требования к конструкции, так как количество воды градирни уменьшается;
• уменьшаются расходы на материалы (в случае использования больших встроенных бетонных приямков градирен);
• совершенствуется эстетический вид конструкции по причине уменьшения высоты градирни.

Наряду со снижением капитальных затрат возможно снижение эксплуатационных расходов для всей системы. За счет использования насоса/или градирни меньшего типоразмера снижение эксплуатационных расходов на их работу компенсирует рост эксплуатационных расходов чиллера. Для расчета годовых эксплуатационных расходов могут использоваться программы типа DOE 2.1, TRACE™ или System Analyzer™. В работах Нордина и Шведлера (Nordeen, Schwedler) [6] показано, что эксплуатационные расходы в системах охлажденной воды, использующих абсорбционные чиллеры, могут быть значительно снижены за счет уменьшения расхода воды через конденсатор. На рисунке 6 показано сравнение эксплуатационных расходов, выполненное с помощью компьютерной программы System Analyzer™.

Рисунок 6 Годовые эксплуатационные расходы



4.45 (гал/мин)/тонну 3.60(гал/мин)/тонну 3.09 (гал/мин)/тонну

Келли и Чен (Kelly, Chan) [5] выполнили сравнение эксплуатационных расходов в системах охлажденной воды на различных объектах. Они пришли к следующему заключению:

" В большинстве случаев более высокое значение ΔT и связанное с ним снижение расхода не только позволяет экономить капитальные затраты (на сооружение), но и обычно приводит к сокращению эксплуатационных расходов за год. Это положение, в первую очередь, справедливо для случаев, когда средства, съэкономленные при сооружении установки, повторно инвестируется в сооружение более эффективных чиллеров. В худшем случае, если стоимость чиллеров остается неизменной, годовые эксплуатационные затраты при использовании более низких расходов воды находятся приблизительно на уровне годовых затрат для

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

"стандартных" номиналов расходов. Однако стоимость первоначальных (капитальных) затрат при этом снижается."

Неправильное понимание концепции низких номиналов расходов

Некоторое недопонимание концепции низких расходов заключается в следующем:

1. Использование низких расходов хорошо подходит только для линий трубопроводов большой длины.

2. Использование низких расходов хорошо подходит только для чиллеров от определенных производителей.

3. Низкие расходы могут использоваться только во вновь сооружаемых системах охлажденной воды.

Рассмотрим каждое из этих ошибочных представлений:

Неправильное утверждение 1 - Использование низких расходов хорошо подходит только для линий трубопроводов большой длины

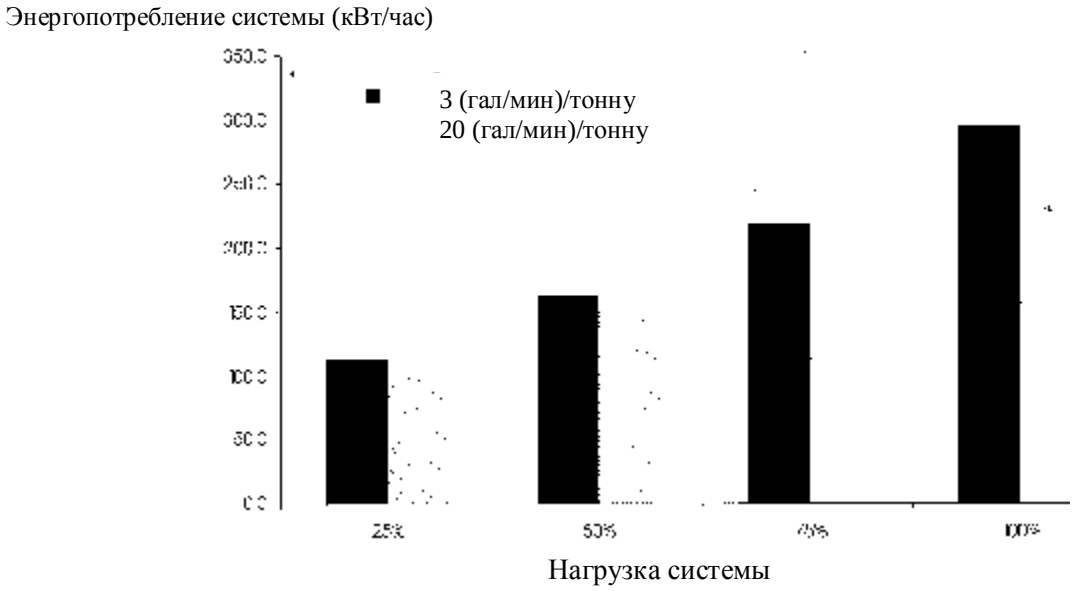
Чтобы прояснить данный вопрос, используем наш предыдущий пример, но обратим большее внимание на контур циркуляции воды через конденсатор. Изучим систему, рассмотренную в разделе "Выбор номиналов расхода". Используем тот же чиллер, но для градирни меньшего типоразмера и при перепаде давления в системе, равном нулю. Изучим эффект уменьшения номинала расхода для такой ситуации.

Таблица 10 Влияние снижение расхода

	Базовые условия	Низкий расход
Расход, гал/мин [л/сек]	1350 [85.]	900 [56.8]
Перепад давления в системе, фут.в. [кПа]	0	0
Перепад давления на пучке конденсатора, фут.в.[кПа]	19.9 [59.5]	9.6 [28.7]
Статический напор градирни, фут.в.[кПа]	19.1 [57.1]	12.6 [37.7]
Выходная мощность насоса, л.с. [кВт]	17.7 [13.2]	6.7 [5.0]
Потребляемая мощность насоса, кВт	14.2	5.4

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 7 Сравнение энергопотребления систем (без трубопроводов)



На рисунке 7 показано энергопотребление с учетом работы чиллера, плюс работы конденсаторного насоса, плюс работа вентиляторов градирни. Учтите, что полная мощность установки охлажденной воды возрастает только при полной нагрузке. При этом учитывайте, что данные приведены для случая абсолютного отсутствия перепада давления на трубопроводах воды конденсатора, вентилях или фитингах. Интересно отметить, что напор в точке разрыва при полной нагрузке составляет около 8 футов (воды) [23.9 кПа]. Обратите внимание также на тот факт, что при всех значениях частичной (неполной нагрузки) суммарная мощность системы с низким расходом находится ниже, чем для базовой системы. Легко понять, что даже для коротких линий трубопроводов сокращение номинала расхода приводит к уменьшению энергопотребления всей установки.

Неправильное представление 2 - Использование низких расходов хорошо подходит только для чиллеров от определенных производителей

Демирчан [3], Элей [4], а также Шведлер и Нордин [6] независимо друг от друга показали, что энергопотребление системы может быть снижено путем уменьшения номинала расхода. Интересно заметить, что в указанных работах изучались системы, использующие чиллеры от различных изготовителей. Несмотря на это экономия энергопотребления систем составила от 2.0 до 6.5 процентов. Во всех случаях, независимо от того, чиллер какого изготовителя использовался в системе, энергопотребление системы снижалось. Демирчан [3] и Шведлер/Нордин [6] отмечают также сокращение фабричной цены системы.

Неправильное представление 3 - Низкие расходы могут использоваться только во вновь сооружаемых системах охлажденной воды

Как было показано ранее в разделах "Изменение конструкции теплообменника (змеевика) при снижении температуры воды на входе" и "Опции градирен при низких расходах", использование более низких номиналов расходов для существующей инфрастуруктуры (насосов, трубопроводов, теплообменников и градирен) может быть использовано и для

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

увеличения холодопроизводительности и/или для снижения расходов на энергопотребление системы.

Таким образом системы с низкими значениями расхода позволяют осуществлять экономию средств даже для случаев малой длины трубопроводов, при использовании чиллеров от всех изготовтелей и при модернизации существующих установок. При выполнении разработки проекта не забудьте проинформировать владельца здания о преимуществах таких систем. Во многих случаях использование сниженных расходов позволяет получить значительный выигрыш.

Литературные ссылки:

1 ARI Standard 550/590-1998, *Standard for Water Chilling Packages Using П Vapor Compression Cycle*, Air-Conditioning & Refrigeration Institute.

2 ARI Standard 560-1992, *Standard for Absorption Water Chiller and Water Heating Package.* Air-Conditioning & Refrigeration Institute.

3 Demirchian, G.H. PE and Maragareci, M.A. PE.: "The benefits of higher condenser-water ΔT at Logan International Airport central chilled-water plant." *IDEA 88th Annual Conference Proceedings,* 1997, pp. 291-300.

4 Eley, C.: "Energy analysis-replacement of chillers for buildings 43, 47, and 48."Eley Associates, CA, April 1997.

5 Kelly, D.W. and Chan, T; "Optimizing chilled-water plants" *Heating/Piping/ Air Conditioning,* January 1999, pp. 145-7.

6 Schwedler, M,, RE. and Nordeen, A.; "Low flow works for absorbers too!" *Contracting Business,* November 1998, pp. 108-112.

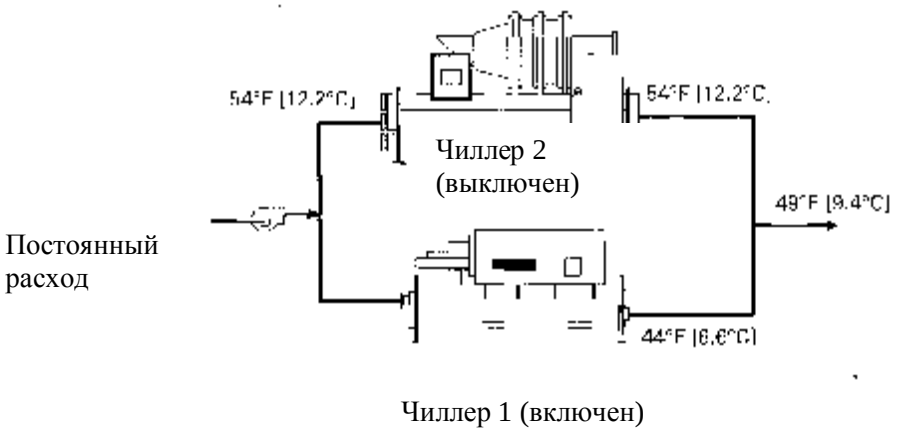
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Многочиллерные системы распространены более широко, чем системы, оборудованные одним чиллером, по той же причине, по которой более часто используются самолеты, оборудованные несколькими двигателями. Использование нескольких чиллеров позволяет обеспечить оптимальный баланс надежности и стоимостных показателей. Наиболее типична система, оборудованная двумя чиллерами. Поскольку нагрузки системы могут изменяться в широком диапазоне, системы, состоящие из нескольких чиллеров, могут часто работать на одном чиллере. В течение таких периодов (если система была спроектирована правильно) может быть сохранена энергия, требуемая для работы второго чиллера и его вспомогательного оборудования.

Параллельное подключение нескольких чиллеров

На рисунке 8 показана система из двух чиллеров, подключенных параллельно и оборудованных одним насосом охлажденной воды.

Рисунок 8 Схема параллельного подключения чиллеров с одним общим насосом охлажденной воды



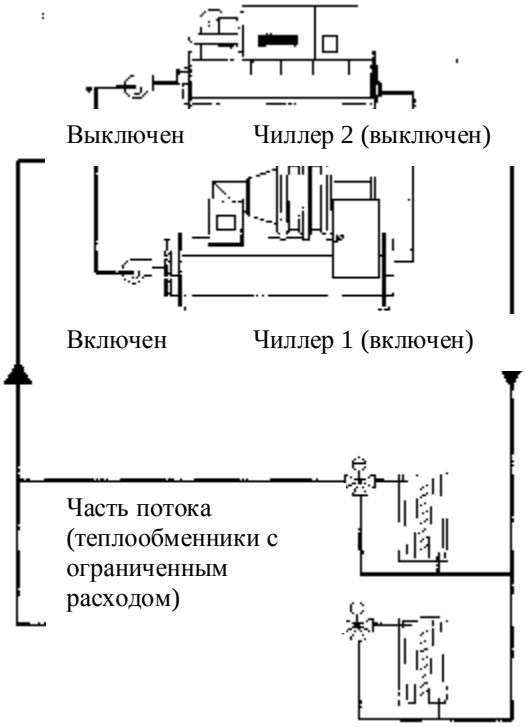
Для нагрузок с постоянным расходом, вода протекает в обоих чиллерах независимо от того, находится ли чиллер в работе или нет. Очевидно, что это может нарушить поддержание температуры охлажденной воды в ситуации, когда в работе находится только один чиллер. Значения температур на рисунке 8 показывают, как возрастает температура воды на подаче, если один чиллер отключается при условиях частичной нагрузки. Это может привести к нарушению процесса осушения или невозможности обеспечить требования специальных потребителей (нагрузок).

Альтернативой для такой ситуации может быть перенастройка работающего чиллера на производство воды с более низкой температурой на подаче. В этом случае температура смеси подаваемой воды может поддерживаться на приемлемом уровне. Однако это приводит к усложнению системы регулирования и возможному увеличению энергопотребления чиллера за счет требования на производство воды с более низкой температурой. Кроме того для этого чиллера существует ограничение по понижению температуры производимой воды, зависящее

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

от предела срабатывания блокировки по низкому давлению чиллера, от предела по низкому значению температуры хладагента в испарителе или пределов по низкой температуре охлажденной воды на выходе.

Рисунок 9 Схема параллельного подключения чиллеров с раздельными насосами



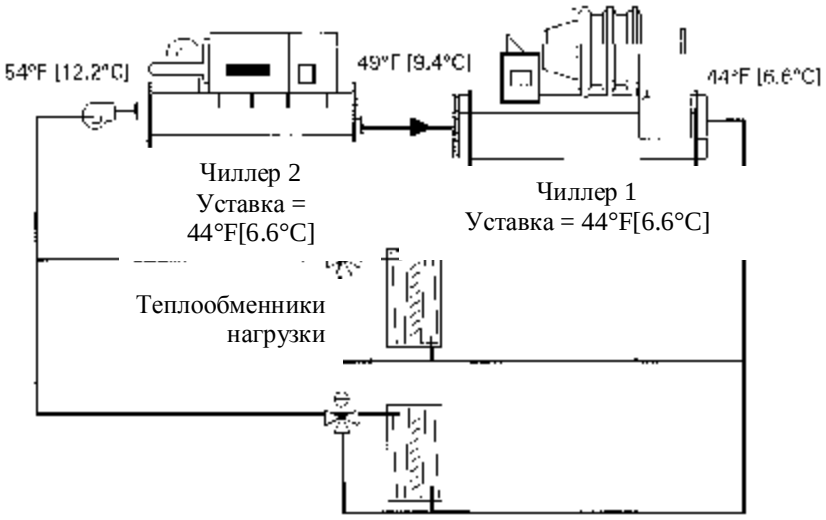
Если в схеме используются чиллеры с раздельными насосами (рисунок 9), включение/вылючение пары чиллер-насос может выполняться совместно. Это позволяет решить проблему смешения потоков, но создает новую, дополнительную проблему. При одном работающем насосе суммарный расход системы значительно снижается. Независимо от требований нагрузки все терминалы потребителей системы будут получать меньше воды. Это может привести к "истощению" нагрузок, расположенных на наибольшем удалении от насоса.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Последовательное подключение нескольких чиллеров

Если чиллеры подключены последовательно, как показано на рисунке 10, исчезает проблема, связанная с температурой смешения потоков, и проблема отсутствия расхода через теплообменники в ситуации, когда один из насосов не работет. При последовательном подключении возникают новые требования к регулированию температуры и расхода.

Рисунок 10 Последовательное подключение чиллеров



При последовательной схеме включения расход через каждый чиллер равен полному расходу системы (в два раза больше, чем расход через отдельный чиллер при параллельном включении двух чиллеров). Это означает, что испаритель чиллера должен принимать удвоенное количество воды. Все остальные параметры остаются равными, что приводит к снижению эффективности работы чиллера. Это снижение эффективности не компенсирует ростом эффективности за счет того, что чиллер, размещенный выше по потоку, работает при более высоких значениях температуры. Кроме того, если чиллеры подключены последовательно, потери давления суммируются. Это может привести к значительному росту суммарных потерь давления в системе. С другой стороны, подключенные последовательно чиллеры могут работать очень хорошо в системах с низким расходом, когда температурный перепад (дифференциал) системы составляет более 16°F [9°C]. При таких условиях потери давления в системе уменьшаются. Более подробно системы с низким расходом были рассмотрены в разделе "Выбор номиналов расходов".

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Существует несколько способов регулирования температуры. На рисунке 10 показана методика регулирования для случаея, когда контроллер на каждом чиллере настроен на проектное значение уставки системы. Каждый чиллер может быть использован на покрытие до 50 процентов нагрузки системы. Если нагрузка в системе составляет более 50%, чиллер расположенный вверх по потоку (подключенный первым) будет нагружен больше, так как он будет пытаться производить охлажденную воду с заданным проектным значением температуры. Оставшаяся доля нагрузки покрывается чиллером, подключенным вторым (ниже по потоку).

Если применить ступенчатую настройку уставок чиллеров (уставка чиллера, подключенного первым, равна 49°F [9.4°C], а уставка чиллера, подключенного вторым, равна 44°F [6.7°C], в первую очередь нагружается второй чиллер. Машина, размещенная выше по потоку (подключенная первой), покрывает ту долю нагрузки системы, которую не сможет обеспечить чиллер, подключенный ниже по потоку. Такая методика регулирования имеет ряд премуществ. Первым преимуществом является, что первый чиллер (расположенный выше по потоку) всегда работает при более высокой температуре. Это позволяет вести его эксплуатацию с большей эффективностью. Размещение первым абсорбционного чиллера позволяет повысить его производительность. Например, абсорбционный чиллер, который производит 500 тонн охлаждения [1760 кВт] при температуре охлажденной воды равной 44°F [6.7°C], имеет холодопроизводительность 600 тонн [2110 кВт] при температуре охлажденной воды, равной 50°F [10°C]. Производительность и эффективность чиллеров с центробежными, винтовыми, поршневыми и спиральными компрессорами меняется в меньшей степени. Правильное использование последовательной конфигурации позволяет применять данные преимущества для уменьшения владельцем здания капитальных затрат и более гибкого использования топлива.

Равное нагружение двух чиллеров может быть обеспечено путем использования системы управления холодильной установкой, с помощью которой выполняется переустановка уставки температуры чиллера, подключенного первым, с зависимости от изменения нагрузки системы.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Первично-вторичные (разделенные) системы

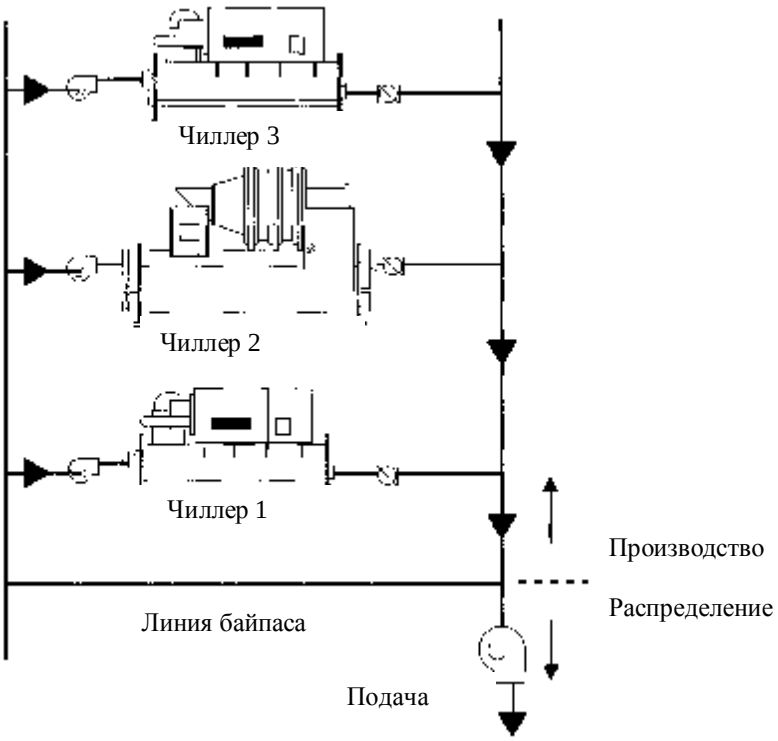
Основной причиной сложности регулирования параллельно-подключенных чиллеров является фиксированное соотношение между расходом чиллера и всей системы. Однако, если бы мы смогли гидравлически отделить производящие трубопроводы (чиллер) от распределительных трубопроводов (нагрузка), то регулирование можно было бы выполнять раздельно.

Основные принципы

Гидравлическое разделение

На рисунке 11 показана принципиальная схема разделенной системы. Такой метод также называется "первично-вторичной" компоновкой трубопроводов. Для производства и распределения (охлажденной воды) используются различные насосы. Хотя одна и та же вода прокачивается дважды (но различными насосами), удвоения потребления энергии на насосную прокачку не происходит. Это объясняется тем, что производящие насосы преодолевают сопротивление чиллера и перепад давления на производящей стороне, а распределительные насосы преодолевают гидравлическое сопротивление распределительной системы.

Рисунок 11 Схема разделеного подключения



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Линия байпаса гидравлически разделяет производящие и распределительные насосы таким образом, что они не могут работать по схеме последовательного подключения.

Хотя две насосные системы и являются независимыми, но они имеют следующие общие элементы:

- трубопровод байпаса;
- статический напор (от столба воды здания) и
- воду.

Изменение расходов или давлений вследствие варьирования динамического напора или числа чиллеров, находящихся в работе, не могут повлиять на функцию линии байпаса.

Гидравлическое разделение зависит только от наличия препятствий (или их отсутствия) в линии байпаса. Полное разделение достигается только в том случае, если байпасная линия имеет нулевое гидравлическое сопротивление (нулевые потери давления) при любом значении расхода. Поскольку обеспечить это в реальной ситуации невозможно, существует определенное взаимовлияние насосов. Важно обеспечить отсутствие в линии байпаса гидравлических препятствий, таких как, например, обратные клапаны. См. также раздел "Обратный клапан на линии байпаса".

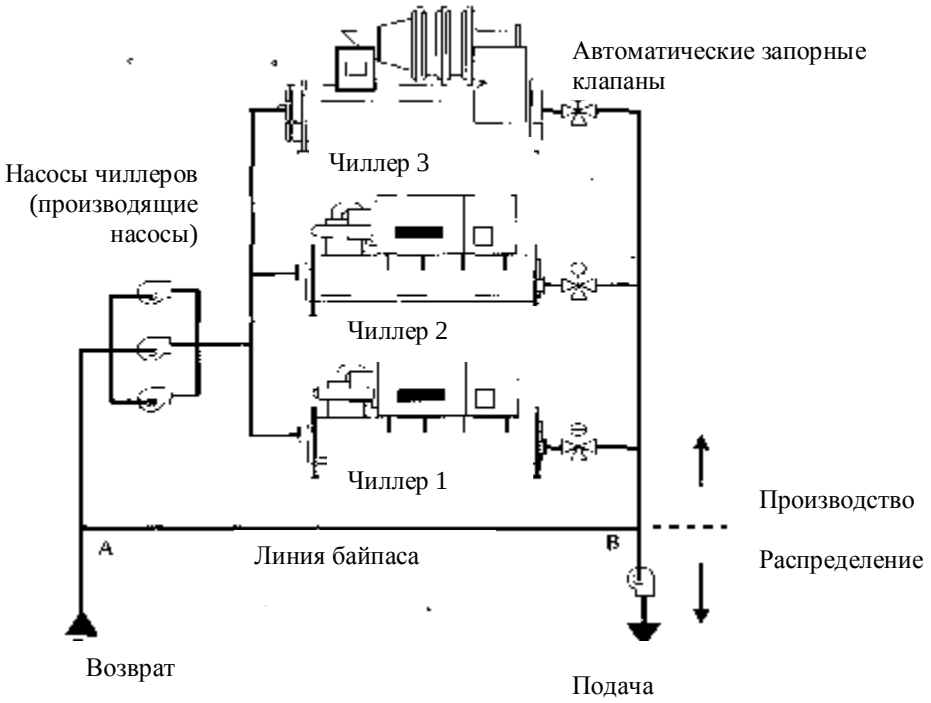
Контур производства охлажденной воды

Отдельный производящий насос (насос чиллера) необходим только для того, чтобы прокачивать воду от возратного коллектора (точка "A" на рисунке 12) через соответствующий чиллер к подающему коллектору на конце линии байпаса (точка "B" на рисунке 12). Этот участок характеризуется относительно небольшим перепадом давления и для выполнения этой перекачки требуется небольшая мощность насосной прокачки. Кроме того, каждый отдельный насос работает только в случае работы соответствующего чиллера.

Производящие контуры являются независимыми, как друг от друга, так и от распределительного контура. Они могут состоять из пар "насос-чиллер", которые выполняют роль независимых чиллеров. Или насосы чиллеров могут быть подключены для работы на общей коллектор. В этом случае их работа организована в зависимости от положения автоматических двухпозиционных клапанов чиллеров и работа осуществляется аналогично работе пар "насос-чиллер". На рисунке 12 показана последняя компоновка. Регулирование температуры также выполняется независимо. Функцию регулирования выполняет обычный контроллер температуры охлажденной воды, смонтированный на чиллере.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 12 Производящий контур



Чиллеры, используемые в такой схеме, могут быть произвольного типа, типоразмера и от любого изготовителя. Если все чиллеры запроектированы на работу при одинаковой температуре охлажденной воды на выходе и на равный температурный перепад (дифференциал) на чиллере, работа системы организована самым простым способом.

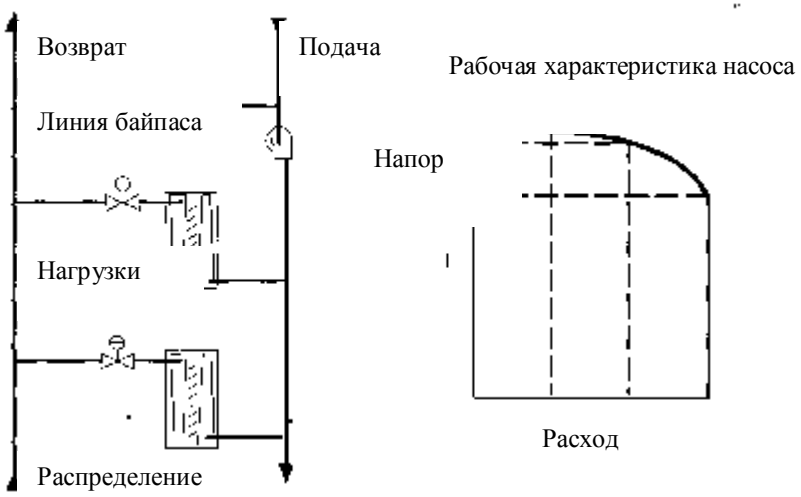
Интересно заметить, что если все чиллеры разделенной системы производят охлажденную воду с равной температурой, то все находящиеся в работе чиллеры нагружаются на равное число процентов. В определенных ситуациях может потребоваться преимущественное нагружение какого-то одного чиллера. Этот вопрос более подробно рассмотрен в разделе "Опции системы охлажденной воды".

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Контур распределения

Распределительные насосы забирают воду из коллектора (тройника) подачи воды (точка "B" на рисунке 12), прокачивают ее по всем распределительным трубопроводам и терминалам нагрузки, а затем подают ее к возвратному коллектору (тройнику) (точка "A" на рисунке 12). Этот насос может (и должен) быть насосом с переменным расходом.

Рисунок 13 Распределительный контур



Не составляет труда понять работу распределительной системы. На рисунке 13 показана упрощенная схема распределительной системы, состоящей из нескольких охлаждающих теплообменников, каждый из которых управляется с помощью клапана, регулирующего расход через соответствующий теплообменник. В этом случае регулирующие клапаны не должны быть трехходовыми, так как поддержания постоянного расхода не требуется. В этом случае используются двухходовые регулирующие клапаны модулирующего типа (с плавной характеристикой регулирования). При изменении расхода рабочая точка насоса с постоянной скоростью вращения будет "перемещаться" по соответствующей характеристике "напор в зависимости от расхода". Это означает, что в ответ на требуемое изменение расхода насос "найдет" новую точку равновесия на рабочей характеристике. Пример рабочей характеристики насоса показан на рисунке 13.

В качестве альтернативы для ограничения динамического напора может использоваться несколько насосов или насосы с переменной скоростью вращения (аналогично регулированию вентиляторов с переменным объемом воздуха (VAV)). Если система спроектирована правильно, мощность насосной прокачки при частичной нагрузке может приближаться к теоретической кубичной зависимости от расхода, что позволяет существенно сократить энергопотребление. В настоящее время в большинстве разделенных систем для насоса контура распределения используется привод с переменной скоростью вращения.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Основные принципы работы системы распределения

Основные преимущества системы распределения обусловлены ее способностью принимать нагрузку, разнесенную во времени, фактом переменного расхода системы и тем, что температура воды на возврате поддерживается на уровне проектного значения (в правильно эксплуатируемой системе). Последнее преимущество более подробно рассмотрено в подразделе "Синдром низкой ΔT".

Разнесенность нагрузки во времени. Не все пики нагрузки имеют место одновременно. Поэтому количество воды, которая протекает в конкретный момент времени, будет меньше расхода "суммы пиков нагрузки", который был бы необходим для контура распределения с постоянным расходом. Это позволяет существенно уменьшить типоразмеры чиллера, насоса и трубопроводов.

Переменный расход. Вода прокачивается только тогда, когда она действительно используется нагрузкой. Это означает, что большую часть времени может быть реализован режим со значительно меньшим расходом, следствием чего является значительное сокращение затрат на энергию насосной перекачки.

Повышенные температуры воды на возврате. Поскольку неиспользованная вода не байпасируется мимо теплообменников охлаждения, вся возвращаемая вода используется для охлаждения. Теоретически температура воды на возврате должна быть равна температуре при полной нагрузке. С практической точки зрения это - не всегда выполнимо, но в правильно эксплуатируемых системах температура воды на возврате близка к этому значению. В реальности для большинства условий частичной нагрузки вода возвращается от нормально функционирующих теплообменников кондиционирования воздуха с температурой, превышающей проектное значение. В системах с использованием противоточных охлаждающих теплообменников это имеет место потому, что температура воды на выходе теплообменника приближается к температуре воздуха на входе теплообменника.

Теплая вода на возврате определяет ряд преимуществ конструкции системы. Она, например, позволяет выполнять "преимущественное" нагружение чиллеров. Теплая вода на возврате полезна для систем всех конструкций, но особенную пользу она приносит для случаев регенерации тепла и свободного охлаждения. Более подробная информация по этому вопросу приводится в разделе "Опции системы охлажденной воды".

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Компоновки схем подключения насосов

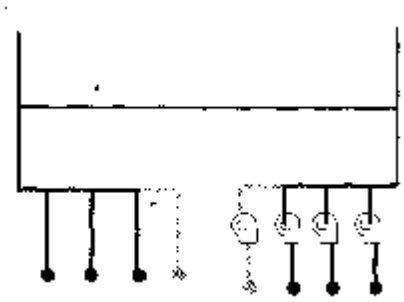
Общая информация

Компоновки систем распределения могут быть самыми различными. Может использоваться одна большая насосная станция (как показано на рисунке 12). Насосная станция может быть оборудована одним или несколькими насосами, работающими в заданной последовательности.

Схема параллельного подключения распределительных систем (компоновка типа "кампус")

Каждая из нескольких распределительных (вторичных) систем может подключаться параллельно. На рисунке 14 показаны раздельные распределительные системы для каждой из трех нагрузок. Такая компоновка позволяет легко осуществлять расширение мощностей установки путем простого подключения дополнительных вторичных распределительных насосов к существующему оборудованию.

Рисунок 14 Схема типа "кампус" (параллельного подключения распределительных систем)



Вторичные распределительные насосы

Разделенная схема (схема использования третьего контура насосной прокачки)

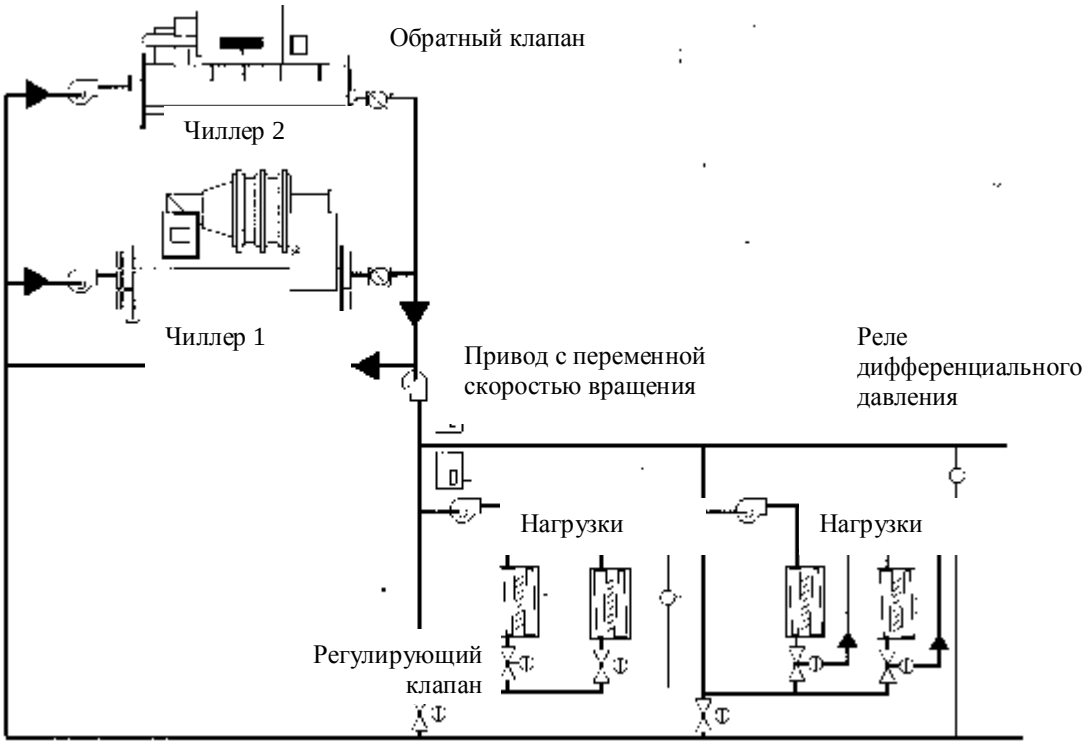
Схема использования третьего контура насосной прокачки (третичная прокачка) используется для расширения возможностей разделенной схемы (первичной-вторичной прокачки) в ситуациях, когда распределительный или вторичный насос должен обеспечить выполнение различных и строгих требований.

Нагрузки системы могут быть также отделены от вторичной распределительной системы. Это часто используется для очень больших систем. На рисунке 15 показана одна из возможных схем организации третьего контура (третичной насосной прокачки) на нагрузках. В качестве "нагрузки" может выступать как целое здание, так и отдельный теплообменник охлаждения. Если одна или несколько нагрузок имеют "экстремальные" требования по напору, диапазон работы распределительного насоса значительно сокращается. Использование третьей насосной системы позволяет "переложить" выполнение избыточных требований по прокачке на третий контур, т.е. отделить распределительный насос от нагрузок с различающимися требованиями к давлению.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Наиболее важным в такой ситуации является то, что регулирование на нагрузках должно выполняться таким образом, чтобы из контура распределения забиралась только вода, действительно необходимая для охлаждения. Вода не должна поступать в трубопроводы возврата до тех пор, пока не будет обеспечен определенный рост ее температуры.

Рисунок 15 Компоновка схемы третичной насосной прокачки (третьего контура насосной системы)

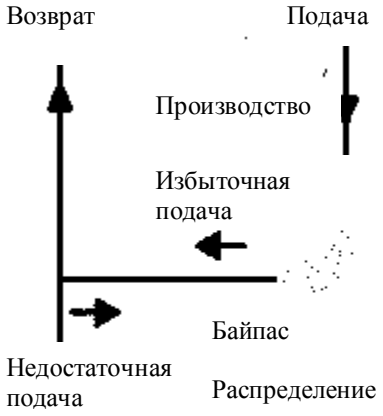


Разъединенная система - принцип работы

Как показано на рисунке 16, на тройнике подключения линий подачи и байпаса существует определенное соотношение между расходами подачи и действительной потребности. Примем за расход подачи суммарное количество воды, подаваемое всеми парами "насос-чиллер". Действительная потребность - это расход в системе распределения, который необходим для покрытия требований всех нагрузок. Если значения расходов подачи и действительной потребности не равны, вода или поступает в линию байпаса или вытекает из нее. Расход может контролироваться или напрямую или опосредованно по температуре воды байпаса.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 16 Тройник (коллектор) подачи разъединенной системы



Если расход на подаче недостаточен для покрытия требований нагрузки, вода из линии возврата перетекает по линии байпаса в систему распределения. Смесь холодной воды, подаваемой чиллером, и теплой воды возврата попадает в контур распределения. Если поток из линии байпаса в тройник (коллектор) подачи может быть проконтролирован (рисунок 16), его наличие может быть использовано для включения следующей пары "насос-чиллер". Увеличение расхода подачи воды от дополнительного насоса изменяет соотношение "подача-потребность" на тройнике (коллекторе), ограничивая подмешивание воды возврата. До тех пор, пока в подающем коллекторе не будет иметь место подмешивания воды возврата, включение дополнительных мощностей чиллера не требуется. Когда будет зафиксировано смешение с водой возврата, то может потребоваться использование дополнительного чиллера (зависит от количества подмешиваемой воды возврата).

Большую часть времени расход подачи превышает действительную потребность и избыток воды поступает в коллектор (тройник) возврата. Если насос чиллера отключается преждевременно, наличие расхода в линии байпаса опять покажет дефицит подачи и насос будет опять включен в работу. Необходимая величина избытка подачи зависит от типоразмера чиллера, который должен быть отключен. Перед выполнением отключения пары "чиллер-насос" величина избыточного расхода должна превышать определенное значение. Этот вопрос более подробно рассмотрен в разделе "Регулирование последовательности работы чиллера". Если все чиллеры, использованные в системе, имеют равный типоразмер, сигнал избыточного расхода может быть постоянным.

Регулирование работы нескольких чиллер выполнятся путем простого определения направления потока в линии байпаса. Таким образом, система работает как система с сигналом запроса по расходу, а не как система с сигналом запроса по температуре.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Регулирование в зависимости от расхода

Чтобы обеспечить нормальный режим работы разъединенной (первично-вторичной) системы, необходимо контролировать направление потока и величину расхода в линии байпаса. Этот контроль может быть выполнен напрямую или опосредованно. Если поток в линии байпаса направлен от подачи к возврату, это называется избытком (подачи). Если поток в линии байпаса направлен от возврата к подаче, это называется дефицитом (подачи).

Измерение расхода

Непосредственное (прямое) измерение расхода в линии байпаса может быть выполнено несколькими способами. В настоящее время успешно используются различные технологии измерения расходов. К ним относятся трубки Пито, Вентури, диафрагмовые расходомеры, измерители расхода по перепаду давления, турбинные, лопастные, магнитные и ультразвуковые расходомеры.
Точность, простота монтажа и технического обслуживания, а также стоимость этих измерительных методов сильно различаются. Чтобы обеспечить необходимую точность измерений, необходимо регулярно выполнять калибровку измерительных приборов. Некоторые расходомеры требуют более частого выполнения калибровки, чем расходомеры других типов. При использовании устройств для измерения расхода важно четко понимать, в каком диапазоне расходов прибор обеспечит необходимую точность измерения, и знать требования, предъявляемые к калибровке. Учтите также, что для получения точных показаний некоторые измерительные устройства должны быть смонтированы на прямолинейном участке трубы, длина которого должна быть равна нескольким диаметрам трубы.

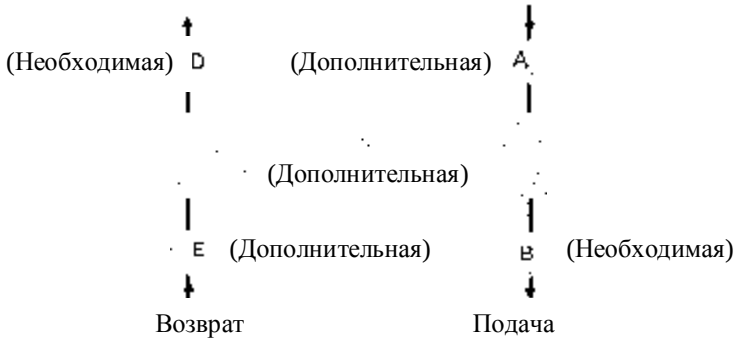
Измерение температуры

Для опосредованного (косвенного) определения соотношения "подача-потребность" могут использоваться потоки смешения на выходе коллекторов (тройников) подачи и возврата воды (см. рисунок 17). Для определения точной величины расхода "избытка" или "дефицита" в линии байпаса могут быть использованы стандартные уравнения для определения температуры смеси.

Проводится измерение пяти температур - в точках A, B, C, D и E. Сигналы измерения этих температуры направляются к программируемому контролеру. (В некоторых системах регулирования температура измеряется только в двух точках - B и D, а затем эти сигналы обрабатываются с помощью заранее запрограммированного алгебраического уравнения для температуры смеси). Компьютерная программа использует классические уравнения смешения и определяет результирующее воздействие для обеспечения правильного регулирования системы охлажденной воды.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 17 Измерение температур



Учтите, что датчик D должен выполнять измерение температур с очень высокой степенью точности, особенно в случае, если в системе использовано несколько чиллеров. Поскольку даже малое изменение температуры может потребовать регулирования последовательности работы чиллера. Методика регулирования путем измерения температуры имеет преимущества по стоимостным показателям и по гибкости применения, особенно, если в здании уже смонтирована система управления работой холодильной установки или монтаж такой системы запланирован.

Последовательность работы чиллеров

Зная величину расхода и направление потока в линии байпаса можно выполнять включение или выключение чиллеров (добавить чиллер/отнять чиллер).

Включение чиллера (добавить чиллер)

При наличии "дефицитного" расхода в линии байпаса система получает воду с температурой, превышающей проектное (расчетное) значение температуры системы. (См. также раздел "Синдром низкой ΔT"). В этот момент времени может быть подключен (добавлен) чиллер и насос. Чтобы гарантировать, что измеренный расход "дефицита" не является следствием переходных процессов в системе, многие операторы требуют подтверждения наличия такого дефицита в течение заданного периода времени (например, в течение 15 минут). Это снижает вероятность циклирования чиллера (т.е. включения и выключения чиллера через короткие промежутки времени).

Отключение чиллера (отнять чиллер)

Чиллер может быть отключен, когда в линии байпаса имеется достаточный избыточный расход. Каким должен быть этот избыток? Величина избыточного расхода должна быть достаточной для того, чтобы чиллер не включился повторно через очень короткий промежуток времени. Многие операторы производят сравнение избыточного расхода с номиналом расхода того чиллера, который они собираются отключить. Если соотношение этих расходов составляет 110-115 процентов, они отключают чиллер.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рассмотрим следующий пример:
Чиллер 1 производит 960 гал/мин [60.6 л/сек] охлажденной воды с температурой 40°F [4.4°C]. Чиллер 2 производит 1440 гал/мин [90.8 л/сек] охлажденной воды. В данный момент времени в линии байпаса имеется избыточный расход 1100 гал/мин [69.4 л/сек]

- Избыточный расход в линии байпаса составляет 115 процентов от расхода 1-го чиллера. Если мы выключим чиллер 1, у нас еще останется избыточный расход в линии бапаса равный 140 гал/мин [8.8 л/сек].

- Обратите внимание на то, что избыточный расход в линии байпаса также составляет 76 процентов от расхода 2-го чиллера. Если мы выключим чиллер 2, то получим дефицит расхода 340 гал/мин [21.5 л/сек]. Ясно, что в такой ситуации мы будем вынуждено скоро опять включить этот чиллер.

В данной ситуации мы должны выключить чиллер 1, но оставить чиллер 2 во включенном состояни. Это будет наиболее эффективным методом использования чиллеров.

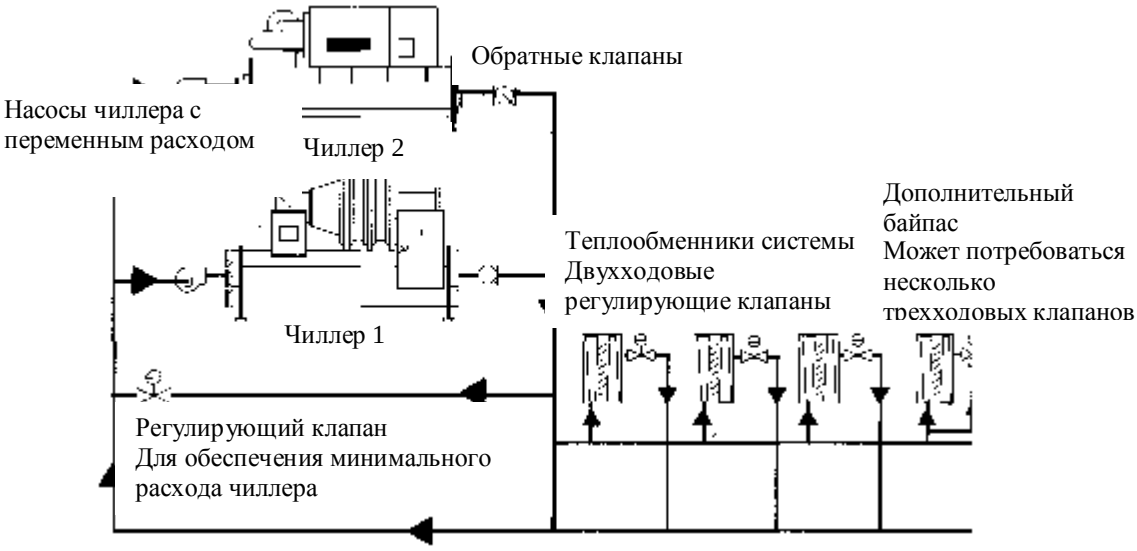
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Системы с переменным расходом в первичном (производящем) контуре

Еще одним методом балансировки расходов в контурах производства и распределения является способ сделать эти расходы равными. Системы с переменным расходом требуют применения чиллеров, которые могут работать в ситуациях, когда расход через испаритель меняется.

Концептуально система с переменным расходом в первом (производящем) контуре (VPF) имеет сходство с системой с постоянным расходом в первом контуре и переменным расходом во втором контуре, известной под названием "разделенной системы" [1]. Например, в обеих системах необходимо использовать байпас. Линия байпаса в системах VPF требуется для обеспечения поддержания минимального протока через чиллеры. На схеме компоновки, показанной ниже, каждый чиллер оборудован своим насосом, работа которого организована в зависимости от режима работы чиллера, который этот насос обслуживает.

Рисунок 18 Система с переменным расходом в первичном (производящем) контуре



В системах VPF ***расход воды изменяется во всей системе***: изменяются расходы через испаритель каждого из находящихся в работе чиллеров, а также изменяются расходы через охлаждающие теплообменники.

В VPF-системах необходимо использовать двухходовые регулирующие клапаны на теплообменниках, обратные (или запорные) вентили на чиллерах и линию байпаса. Однако:

- использование насосов чиллера с переменным расходом исключает необходимость применения отдельного распределительного насоса;

- байпас может быть размещен до или после (вверх или вниз по потоку) теплообменников охлаждения;

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

• регулирующий клапан, смонтированный на линии байпаса, обеспечивает, что величина расхода через чиллер(ы), находящийся в работе, никогда не снизится ниже минимального граничного значения.

Премущества систем VPF

Системы VPF дают владельцам зданий ряд преимуществ, позволяющих обеспечить экономию средств, относящихся непосредственно к насосам. Наиболее заметная экономия достигается за счет отказа от использования распределительного насоса во втором контуре. Это, в свою очередь, позволяет исключить затраты на материалы и оплату работ, связанных с подключением трубопроводов, сервисом электроприборов и приводов с переменной скоростью вращения. Хотя общее число насосов сокращается, но типоразмеры как насосов, так и приводов с переменной скоростью вращения возрастают, так как насосы должны быть рассчитаны на перепад давления во всей системе. Это позволяет обеспечить экономию капитальных затрат за счет уменьшения числа насосов.

Экономия энергозатрат за счет снижения энергопотребления насосов часто является основной причиной, почему владельцы зданий хотят смонтировать систему VPF. С помощью компьютерных программ анализа, таких как System Analyzer, TRACE 600 или DOE 2.1 можно определить, будет ли обеспечена экономия энергозатрат за счет использования системы с переменным расходом в первом контуре для конкретного случая применения.

Может оказаться, что для существующей установки охлажденной воды будет легче использовать схему системы с переменным расходом в первом контуре, чем "первично-вторичную" (разъединенную) схему. В отличие от компоновки разъединенных ("первично-вторичных") систем линия байпаса в этом случае может быть размещена в любом месте контура циркуляции охлажденной воды. Кроме того в этой ситуации не требуется использования дополнительного насоса.

Рассеивание неправильного представления

Правильным или ложным является утверждение: "Чиллеры работают более эффективно в системах с переменным расходом в первичном контуре, чем при постоянной величине расхода, так как это связано с более высоким значением LMTD (LMTD=логарифм усредненного температурного дифференциала)".

Правильным являтся тот факт, что температура воды на возврате в правильно работающей системе VPF остается постоянной, так как меняется величина расхода. Правильным является также утверждение, что величина LMTD может быть увеличена путем перевода контура производства охлажденной воды (первого контура) с постоянного на переменный расход. Но при этом необходимо учитывать еще и другие факторы:

В системах с постоянным расходом в первом контуре:

• температура на входе испарителя и величина LMTD снижаются при уменьшении нагрузки по охлаждению;

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

• коэффициент конвективной теплопередачи, также как и расход в первом контуре, остается постоянным, несмотря на снижение нагрузки.

В системах с переменным расходом в первом контуре:

• коэффициент конвективной теплопередачи в испарителе чиллера снижается при уменьшении расхода

• снижение расхода приводит к уменьшению общей эффективности теплопередачи на испарителе чиллера

Поэтому энергопотребление данного чиллера будет фактически одинаковым как при переменном, так и при постоянном расходе через испаритель чиллера.

Предостережения для случаев использования метода VPF

Регулирование последовательности работы чиллеров требует правильного понимания динамики системы, так как номиналы расходов через каждый чиллер, находящийся в работе, будут меняться. Методика регулирования, при которой должно быть исключено слишком частое включение/выключение чиллеров, усложняется, так как возрастает число чиллеров с различной производительностью. Уже на ранней стадии проектирования разработчик системы должен определиться с логикой регулирования и выполнять разработку проекта в тесном контакте с провайдером устройств регулирования. Еще лучший результат для таких систем может быть достигнут за счет налаживания партнерских связей между собственником, оператором (службой экспуатации), проектантом и провайдером оборудования холодильной установки (включая устройства регулирования).

Критичным является регулирование при изменениях (флуктуациях) расхода. Уточните у изготовителя чиллера допустимые значения изменения (флуктуаций) расходов и спроектируйте систему таким образом, чтобы номиналы изменения расходов никогда не выходили за допустимые границы. Операторы (эксплуатационный персонал) должны правильно понимать, каким образом работает система VPF. Поэтому в обязательном порядке должно быть проведено обучение эксплуатационного персонала. Успех применения такого проекта во многом зависит от способности эксплуатационного персонала выполнить замысел разработчика.

Важным при анализе систем с переменным расходом в первом контуре является тот факт, что для надлежащего выполнения проектирования и пуско-наладочных работ в системах VPF требуется больше времени по сравнению с другими системами. Если возможность инвестировать это дополнительное время и усилия отсутствует, вероятно, лучшие результаты могут быть получены от использования систем другого типа, а не VPF.

Ограничения

Расход через испаритель изменяется при изменении "потребности". Однако существуют определенные ограничения абсолютных значений и допустимая скорость изменения расходов.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Выход за эти ограничения может привести нестабильности режима регулирования чиллера или к серьезным отказам.

Ограничения расхода по абсолютному значению

Поддерживайте расход через испаритель между минимально допустимым и максимально допустимым граничными значениями. На сегодняшний день диапазон скоростей воды, указываемый в каталогах для многих типов чиллеров, составляет 3-11 фут/сек [0.9-3.4 м/сек]. Хотя некоторые изготовители допускают также работу в диапазоне 1.5 - 2 фут/сек [0.46-0.61 м/сек]. Запросите у изготовителя чиллера реальные значения границ расхода для вашей машины. Верхняя граница обычно выбирается таким образом, чтобы исключить возникновение проблем эрозионного износа труб. Нижняя граница обеспечивает стабильность режима регулирования.

Скорость изменения расхода

Если система регулирования чиллера не обеспечивает адекватного управления, быстрое изменение величины расхода может привести к отключению чиллера и срабатыванию блокировок защиты. Чтобы сохранить чиллер в работе, поддерживайте скорость изменения расхода через испаритель в границах, заданных изготовителем. Чтобы снизить скачки расходов при регулировании последовательности работы чиллеров (особенно, если насосы работают на общий коллектор), это может потребовать использования на каждом чиллере регулирующих клапанов замедленного действия.

Регулирование расхода в линии байпаса

Так же как и разъединенные ("первично-вторичные") системы, системы VPF реагируют на изменение нагрузки путем варьирования расхода. Когда нагрузка системы приближается к значению минимального номинала расхода для одного чиллера, должно выполняться байпасирование воды, чтобы обеспечить поддержание расхода через испаритель чиллера на уровне, превышающем это минимальное значение.

Методы регулирования

- Линия байпаса с регулирующим клапаном. Как уже обсуждалось ранее, байпасирование может регулироваться или путем размещения в определенном (центральном) положении, или путем использования трехходовых клапанов. Если используется линия байпаса с регулирующим клапаном, этот клапан должен быть медленного действия и должен открываться тогда, когда расход в одном из подключенных чиллеров приближается к заданной минимальной границе. Когда расход превысит заданный для чиллера минимум на заданную величину, клапан может закрыться.

- Трехходовой клапан. Альтернативным методом регулирования является размещение трехходовых клапанов в определенных точках системы. Регулирование работы насоса должно выполняться таким образом, чтобы эти клапаны всегда обеспечивали поддержание суммарного расхода на уровне, превышающем минимальный расход чиллера. Одним из методов обеспечения такого номинала

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

расхода является регулирование работы насоса, чтобы поддерживать определенную разность давления на этом клапане, т.е. обеспечивая приблизительно постоянный расход в этой точке системы.

Поскольку теперь допускается изменение расхода через испаритель чиллера, чиллеры, оборудованные усовершенствованными устройствами регулирования, могут реагировать на этот процесс путем временного разгружения. Это обычно проявляется в кратковременном повышении температуры охлажденной воды на выходе. В случае наличия строгих требований к регулированию температуры охлажденной воды обсудите с изготовителем чиллера рекомендации, относящиеся к использованию систем с переменным расходом через испаритель.

Большинство усовершенствованных устройств регулирования чиллера могут обеспечить точное регулирование температуры в случае, если флуктуации расхода не превышают 10% от проектного значения расхода в минуту. Для некоторых регуляторов в случае комфортного охлаждения допускается скорость изменения до 30% от проектного значения расхода в минуту (так как температура воды на выходе испарителя не отклоняется от величины уставки более, чем на несколько минут, если вообще отклоняется). Еще раз повторяем, что эти ограничения необходимо обсудить с изготовителем чиллера.

Измерение расхода через испаритель

Измерение расхода через испаритель является критичным моментом при регулировании систем VPF. На практике наиболее часто используется прямое измерение расходов с использованием расходомеров (учитывайте, что некоторые расходомеры требуют регулярного выполнения калибровки). Еще одним возможным методом определения расхода является измерение перепада давления на трубном пучке испарителя с дальнейшим определением расхода испарителя по данным изготовителя.

Место размещения линии байпаса

Использование байпаса необходимо как при постоянном, так и при переменном расходе в первичном контуре. В "первично-вторичной" системе разъединение компоновки позволяет байпасировать избыток воды первичного контура. В системе VPF использование байпаса позволяет системе регулирования поддерживать расходы чиллеров на уровне минимально необходимых.

Линия байпаса в системах VPF может быть размещена в трех местах:

• Линия байпаса, но только меньшего размера размещается в системе VPF в том же месте, что и для разделенной системы. Привод с переменной скоростью вращения на насосе, размещенном поблизости от чиллеров, обеспечивает уменьшение расхода и, соответственно, экономию энергопотребления и эксплуатационных затрат. Недостатком такой схемы является то, что клапан должен работать при более высоких давлениях (может приводить к износу и ухушению процесса регулирования).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

• Использование трехходовых клапанов на некоторых теплообменниках системы. Такой подход обеспечивает минимальный расход чиллера, снижает экономию затрат на работу насоса (вследствие увеличения расхода системы) и приводит к уменьшению температуры воды на возврате.

• Размещение линии байпаса и клапана вблизи конца трубопровода. Регулирующий клапан на линии байпаса работает при более низком давлении и обеспечивает устойчивый режим регулирования. Некоторой экономией эксплуатационных расходов можно пожертвовать для поддержания рабочего давления насоса на более высоком уровне при размещении байпаса на удалении от чиллеров. Размер линий байпаса должен быть достаточным большим, чтобы обеспечить наличие минимального расхода.

Регулирование последовательности работы чиллеров

Системы с переменным расходом в первичном контуре характеризуются более сложным процессом регулирования последовательности работы чиллеров, чем "первично-вторичные" системы. Действительно, необходимо так организовать последовательность работы чиллера, чтобы обеспечить хорошую работу системы VPF. В противном случае это приведет к отказу системы. Разработчики системы должны продумать весь процесс, связать его с последовательностью операций (используя для этого программирование на уровне системы) и убедиться, что оператор системы понимает принцип работы системы.

Включение чиллера (добавить чиллер) в системе VPF

В ситуации, когда чиллер(ы) находится в работе, и его расход не может быть увеличен (вследствие ограниченной производительности насоса или достижения максимально допустимого расхода через испаритель) или в ситуации, когда чиллеры не могут обеспечить поддержание уставки температуры охлажденной воды системы, может быть включен в работу дополнительный чиллер. При правильной эксплуатации системы выполняется мониторинг температуры подачи воды. Если температура становися выше расчетного значения уставки на определенную величину в течение определенного периода времени (например, на 1.5°F [0.8°C] в течение 15 минут) запускается дополнительный чиллер.

Когда чиллеры включаются "в линию", могут иметь место значительные флуктуации расхода. В первую очередь, это справедливо для систем, состоящих из двух чиллеров. В таблице ниже приведен пример с пояснением.

Таблица 11 Примеры изменений (флуктуаций) расхода

	Проектное значение расхода гал/мин (л/сек)	Минимальное значение расхода гал/мин (л/сек)	Максимальное значение расхода гал/мин (л/сек)
Чиллер 1	960 (60.6)	576 (36.3)	2110 (133.1)
Чиллер 2	1440 (90.8)	675 (42.6)	2474 (156.1)

Рассмотрим момент времени, когда задействован чиллер 1, который имеет расход 1100 гал/мин [69.4 л/сек], проходящий через испаритель. Этот чиллер не может более обеспечить поддержание требуемого значения температуры воды на подаче. Что произойдет, если клапан

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

второго чиллера будет открыт, без принятия каких-то дополнительных действий. Если мы предположим, что перепады давления на этих чиллерах равны, расход через каждый из чиллеров будет составлять 550 гал/мин [34.7 л/сек]. Это означает, что внезапно расход через чиллер 1 упадет на 50 процентов (возможно ниже значения, которое допускает устойчивое регулирование) и расход каждого из чиллеров будет лежать ниже минимально допустимого значения. Путем комбинации воздействия на скорость вращения насоса, путем регулирования клапана на байпасе и воздействия на вентили замедленного действия на чиллерах должны быть обеспечены две вещи:

- поддержание изменения расхода в рамках граничных значений для данного типа оборудования;
- поддержание расхода каждого из чиллеров на уровне выше минимально допустимого значения.

Последнее положение ДОЛЖНО быть обеспечено при разработке системы регулирования системы VPF.

Выключение чиллера в системе VPF

Выключение чиллера в системе VPF не является простым. В качестве примера предположим, что оба чиллера работают при расходах, близких к значению минимума. Чиллер 1 работает с расходом 650 гал/мин [41.0 л/сек], а чиллер 2 с расходом 760 гал/мин [47.9 л/сек]. Суммарный расход системы составляет 1410 гал/мин [88.9 л/сек].

Первая возможность

Отключение чиллера 1
Очевидно, что мы можем отключить чиллер 1 и обеспечивать нагрузку системы до тех пор, пока расход системы не начнет увеличиваться слишком быстро. Однако номинал расхода системы близок к проектному значению расхода чиллера 2. Поэтому, если расход системы увеличится, мы будем вынуждены вновь включить в работу чиллер 1.

Вторая возможность

Отключение чиллера 2:
Если чиллер 1 имеет температуру воды в конденсаторе, лежащую ниже проектного значения, его производительность возрасла. Можем ли мы выключить чиллер 2? Расход чиллера 1 будет точно находиться в допустимых границах, но сможет ли или нет чиллер 1 обеспечить требуемую производительность? В данном случае возникает дилемма обеспечения достаточной производительности по охлажденной воде после выключения чиллера.

Процесс регулирования имеет очень большое значение применительно к системе VPF. Чтобы минимизировать сложности процесса регулирования, многие проектировщики при разработке систем охлажденной воды, состоящих из двух - до пяти чиллеров, часто используют "первично-вторичную" систему.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

"Перезакачка" чиллера в системе VPF

Некоторые разработчики VPF-систем используют схему подключения насосов на общий коллектор, допуская "перезакачку" чиллера. В данном контексте "перезакачка" означает, что насос прокачивает через чиллер больше воды, чем это рекомендовано в оригинальном проекте. Для предыдущего примера "перезакачка" чиллера 1 будет иметь место всякий раз, когда расход воды через испаритель превысит 960 гал/мин [60.6 л/сек]. Однако величина расхода не должна превышать максимально допустимого значения. Помните, что перепад давления на испарителе увеличивается пропорционально квадрату расхода. Существует две причины, по котором целесообразна "перезакачка" чиллера.

Если допустить снижение температуры воды в конденсаторе, чиллер сможет производить больше охлаждения - если это допустимо. Единственным способом использовать эту увеличившуюся производительность является или увеличение величины расхода или увеличение температурного дифференциала (перепада). Если температура воды на возврате задана жестко, проблему можно решить или путем снижения температуры воды на выходе или путем увеличения расхода. Изменение температуры воды усложняет режим работы системы. Увеличение расхода воды может быть наиболее простым решением для систем VPF. При увеличении расхода воды через испаритель чиллер может обеспечить большее охлаждение.

Некоторые операторы "перезакачивают" чиллер, используя "синдром низкой ΔT" (см. соответствующий раздел). Примером "синдрома низкого ΔT" является получение температуры воды на возврате с температурой ниже, чем величина проектного значения (например, 49°F [9.4°C] вместо 56°F[13.3°C]). В этой ситуации единственным способом загрузить чиллер является снижение температуры охлажденной воды или увеличение расхода. Если позволяет мощность насоса и скорость его вращения, оператор может увеличить расход и производительность чиллера. Не допускается выход за диапазон рабочих параметров насоса.

Критические требования, предъявляемые к системам VPF

Поскольку использование систем с переменным расходом в первичном контуре должно приносить определенные преимущества, их использование может быть рекомендовано не для всех типов систем [1]. Ниже перечислены факторы, являющиеся критичными для успешной работы систем VPF.

- Регуляторы чиллеры должны обеспечить адекватное регулирование температуры при изменении расхода.
- Регуляторы уровня системы должны обеспечить соответствующее регулирование как температуры, так и расхода при изменении нагрузки системы.
- На разработку и программирование последовательности регулирования системы должно быть отведено соответствующее время.
- Оператор системы должен понимать происходящие процессы
- Система должна быть оборудована одним из средств обеспечения минимального расхода для всех чиллеров (обычно, одним из методов байпасирования, рассмотренных ранее).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Использование систем VPF приводит к существенному усложнению как конструкции системы, так и к ее эксплуатации. Чтобы обеспечить нормальную эксплуатацию системы VPF, должно быть выполнено много условий.

Литературные ссылки раздела:

1. Schwedler M., PE and BradleyB., "An Idea for Chilled-Water Plants Whose Time Has Come... Variable-Primary-Flow Systems", Engineers Newsletter, Volume 28, No.3, The Trane Company, 1999.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Опции регулирования температуры охлажденной воды

Переопределение уставки охлажденной воды - повышение и понижение

Для снижения энергопотребления чиллера на многих установках по производству охлажденной воды используется опция изменения уставки температуры охлажденной воды, т.е. изменения уставки регулирования чиллера. Как было показано в первом разделе данного издания "Основы производства охлажденной воды", увеличение температуры охлажденной воды позволяет снизить энергопотребление чиллера. В насосных системах с постоянным расходом это может позволить уменьшить энергопотребление всей системы (до тех пор, пока обпеспечивается регулирование влажности). Сбой в регулировании влажности может быть получен в том случае, если температура охлажденной воды возрастает и температура воздуха на выходе теплообменника вырастает до значения, при котором не может быть обеспечено выполнение требуемого осушения.

В системах с переменным расходом насосной прокачки увеличение температуры охлажденной воды приводит к увеличению энергии, потребляемой насосом, и часто, к значительному росту суммарной энергии, потребляемой системой. Перед тем, как принять решение об увеличении температуры охлажденной воды, оператор системы должен рассчитать увеличение энергии на насосную перекачку и сравнить это значение с экономией энергопотребления чиллера. Необходимо отметить, что стандарт ASHRAE/IESNA 90.1-1999 требует использования опции переопределения уставки температуры охлажденной воды для систем с постоянным расходом. Системы с переменным расходом исключены из этого требования по причинам, изложенным ниже.

Часто игнорируемым методом снижения энергопотребления системы является метод уменьшения температуры охлажденной воды, позволяющий сократить энергозатраты на насосную перекачку, но приводящий к росту энергопотребления чиллера. Снижение температуры охлажденной воды также позволяет улучшить процесс осушения воздуха в здании. Еще одним следствием снижения температуры охлажденной воды является увеличение производительности чиллера в моменты, когда температура воды конденсатора лежит ниже проектного значения. До запуска следующего чиллера и его вспомогательного оборудования проходит больше времени. Эта опция более подробно освещена в разделе "Синдром низкой ΔT".

Чтобы обеспечить соответствие требованиям нагрузки системы, любое изменение уставки температуры охлажденной воды требует проведения изменений в алгоритме программы регулирования последовательности работы чиллеров системы. Это не гарантирует от возникновения дополнительных усложнений.

Критичные моменты при переопределении уставки работы насоса

Часто, работа насосов регулируется таким образом, чтобы поддерживать постоянный перепад давления на выносном теплообменнике. Поскольку такой теплообменник обслуживает зону, требующую максимального охлаждения (критичную зону), насос прозводит большее давление и потребляет большее энергии, чем это необходимо. Установки, оборудованные системами регулирования на воздушной стороне и системами регулирования всей чиллерной установки,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

оснащены клапанами с DDC-цифровыми контроллерами, позволяющими сократить расходы на эксплуатацию насосов. Если мониторинг системы организован таким образом, чтобы определить "критичное" значение в каждый момент времени, давление работы насоса может быть изменено так, чтобы регулирующий клапан критичной зоны находился в положении, близком к положению открытия. Встроенный регулятор позволяет контроллеру уровня системы определить критичную зону и динамично переопределить уставку работы насоса и, таким образом, снизить затраты на эксплуатацию насоса.

Контроллер "знает" положение отдельных клапанов, которые изменяют и обеспечивают необходимый расход воды через теплообменник. Система автоматизации здания выполняет постоянный мониторинг контроллеров клапанов, определяя открытые клапаны. Контроллер переустанавливает уставку работы насоса таким образом, чтобы, по крайней мере, один клапан (требующий самого высокого давления на входе) находился в положении, близком к положению полного открытия. Результат такой стратегии проявляется в том, что насос производит только давление, необходимое для обеспечения требуемого расхода воды через "критический" клапан, что позволяет экономить энергозатраты на насосную перекачку.

Литературные ссылки раздела:

1. BSR/ASHRAE/IESNA 90.1-1999, "Energy standard for buildings exept low-rise residential buildings". Illuminating Engineering Society of North America and American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.,1999.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Конфигурация схем включения насосов охлажденной воды

Насосы могут быть смонтированы или на входе или на выходе чиллера (если на входе насоса обеспечено соответствующее положительное давление всасывания). В случаях наличия значительного напора столба жидкости (например, в многоэтажном здании) насос часто размещается на выходе чиллера, так что испаритель находится под давлением статического напора, а не статического плюс динамического (создаваемого насосом) напора. В этом случае отпадает необходимость использования водяных крышек высокого давления на чиллере.

Дополнительным преимуществом размещения насоса вверх по потоку (до) чиллера является тот факт, что тепло, выделяемое электродвигателем насоса и передаваемое воде, может быть снято непосредственно на чиллере. Чиллер не должен компенсировать тепло, выделяемое насосом, производя более холодную воду.

Один насос на чиллер

Использование одного насоса на каждом чиллере (как в разъединенных системах, так и в системах с переменным расходом в первом контуре) существенно способствует упрощению гидравлики системы. Выбор насоса может быть выполнен только с учетом необходимого расхода и перепада давления для конкретного чиллера. Использование дополнительных насосов изменяет (но минимально) гидравлику системы. Недостатком такой схемы является отсутствие резерва в системе. Этот недостаток может быть исправлен путем использования резервного насоса и системы трубопроводов и вентилей, смонтированных таким образом, чтобы в случае возникновения аварийной ситуации этот резервный насос смог работать с любым чиллером.

Насосы, работающие на общий коллектор

Для выполнения требования наличия резерва в системе некоторые проектировщики предпочитают использовать схемы насосов, подключенных на общий коллектор, с числом насосов "n+1" (где n - число чиллеров в системе). Такая компоновка позволяет использовать любой насос для любого чиллера. Однако гидравлика такой схемы становится более сложной. Хотя перепады давления на испарителях равны, расходы воды через чиллеры будут отличаться. Как уже было ранее отмечено для систем с переменным расходом в первом контуре, использование насосов, работающих на обший коллектор, создает трудности с регулированием при организации последовательности работы нескольких чиллеров.

Каждая из схем подключения насосов может применяться с успехом: схема "один насос на чиллер" упрощает гидравлику системы, а схема включения насосов на общий коллектор повышает надежность системы (обеспечивает наличие резерва).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Определение типоразмера линии байпаса

Линии байпаса необходимо использовать как для разъединенных (первично-вторичных) систем, так и для систем с переменным расходом в первом (производящем) контуре (VPF). В разделенной системе размер линии байпаса должен быть рассчитан на 110-115% номинала расхода самого большого чиллера. В системе VPF линия байпаса должна быть рассчитана на минимальный расход самого большого чиллера.

Хоты в линии байпаса и необходимо обеспечить минимальные потери давления, но при относительно небольшой длине линии байпаса без значительных потерь давления может быть обеспечена значительная скорость воды. В то же время длина линии байпаса должна быть достаточной, чтобы гарантировать отсутствие смешения потоков подаваемой и возвращаемой воды. Рекомендуемая длина линии байпаса должна быть равна не менее пяти-десяти диаметрам этой линии.

Количество жидкости в контуре

Чтобы обеспечить надлежащее регулирование системы охлажденной воды, при определении количестве воды в контуре, необходимо дать ответ на два вопроса:

- Как быстро сможет прореагировать данный чиллер на изменение условий?
- Как быстро сможет прореагировать система на изменение условий?

Количество жидкости, необходимое для обеспечения надлежащего режима работы, определяется большим из этих двух значений. Учтите, что оба вопроса относятся в временным характеристикам.

Необходимый объем = Номинал расхода x Время контура

где:

- Необходимый объем = количество жидкости в теплообменнике, испарителе, баке-накопителея и т.д (в галлонах [литрах]).
- Номинал расхода = Номинальный расход системы (в гал/мин [л/сек]).
- Время контура = Время, которое требуется жидкости, чтобы выйти из чиллера, пройти через систему и вернуться в чиллер, чтобы обеспечить устойчивый режим работы системы (в минутах [секундах]).

"Реакция" чиллера на изменение условий

При рассмотрении конкретного чиллера воспользуйтесь рекомендациями изготовителя. Это позволит определить абсолютное минимальное количество воды в контуре. Однако, как будет показано в следующем разделе, этот объем является минимальным объемом чиллера, а не минимальным объемом всей системы. Многие из современных чиллеров оборудованы регуляторами, обеспечивающими быстрый отклик на изменение условий. Некоторые чиллеры могут "среагировать" на изменение температуры воды на возврате в течение одной минуты. Для других чиллеров это время может составлять пять или более минут. Время отклика меняется в зависимости от типа и конструкции чиллера.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Отклик системы на изменение условий

Важно понять, что даже если чиллер может быстро "среагировать" на изменение условий работы, минимальное время "реакции" контура может определяться временем взаимодействия между чиллером, насосами системы и регулирующими клапанами. Проверьте взаимодействие этих элементов, чтобы обеспечить устойчивый режим регулирования системы.

Пример:
Рассмотрим чиллер, требующий для нормального режима работы, как минимум две минуты на прохождение воды. Однако после рассмотрения взаимодействия работы элементов системы приходим к выводу, что система будет лучше работать при времени прохождения контура, равном 5 минутам. Номинал расхода системы составляет 960 гал/мин [60.8 л/сек].

Необходимый объем = 960 гал/мин x 5 мин = 4800 гал
[Необходимый объем = 60.6 л/сек x 5 мин x 60 сек = 18160 литров]

Если объем жидкости в трубном пучке испарителя, в трубопроводах и теплообменниках меньше указанного необходимого объема, нужно использовать дополнительную емкость, чтобы увеличить объем контура. Для обеспечения оптимальной стабильности режимов работы системы эта емкость должна быть смонтирована на возврате воды, чтобы смешивать поток воды возврате с водой, находящейся в данный момент времени в баке (емкости).

Расширение мощностей установки

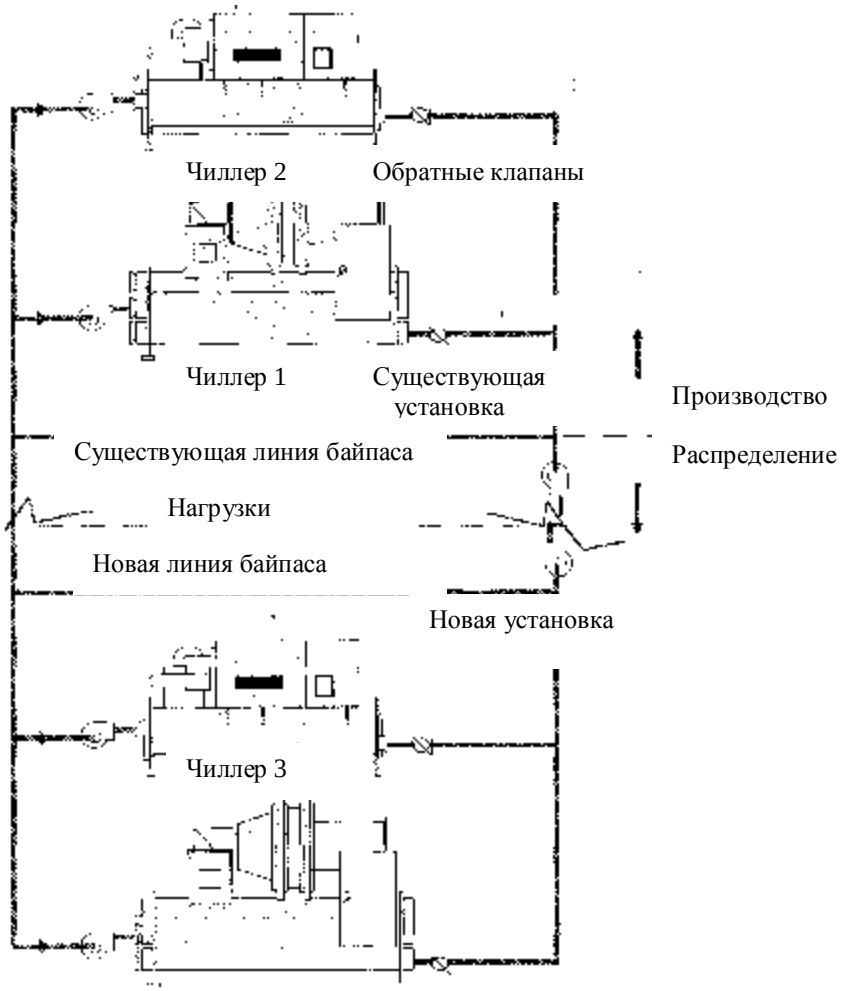
Расширение мощностей установки может быть легко выполнено как для двухконтурных (первично-вторичных) систем, так и для систем с переменным расходом в первом контуре, путем использования дополнительного чиллера и насоса. При рассмотрении этого проекта необходимо определиться с ответами на два вопроса: рассчитаны ли трубопроводы распределения охлажденной воды на нужный расход, и каким образом смонтировать новый чиллер, в то время как остальные чиллеры все еще производят охлаждение.
Если трубопроводы рассчитаны на номинал расхода новой системы и насосы могут подавать достаточное количество воды, такой подход работает успешно. Чтобы обеспечить расход охлажденной воды во время монтажа нового чиллера, на некоторых установках на месте нового чиллера монтируются трубные отводы. Таким образом монтаж нового чиллера может выполняться на действующей системе. После окончания монтажа можно открыть вентили на трубных отводах.

Если разъединенная система используется для больших систем типа "кампус" (с параллельным поключением нагрузок), новые дополнительные нагрузки часто размещаются на некотором удалении от уже существующих нагрузок. Проектировщикам всегда нравится идея "подвесить" новые нагрузки к уже существующей системе. Схема с двумя концами, показанная на рисунке 19, является одним из возможных решений поставленной задачи. Вторая производственная мощность размещается в удобном месте в новой части кампуса. Распределительная установка представляет собой зеркальное отображение существущих распределительных трубопроводов и подсоединяется к концам каждой системы.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

При такой компоновке любой из производственных контуров может быть подсоединен к общему контуру распределения. Точка отсуствия расхода просто "плавает", так как нагружены обе производящие установки. Если оператор хочет обезопасить (отключить) целиком один контур при очень малых (сезонных) нагрузках, это не представляет сложности, если подключенная установка имеет соответствующую мощность производства и распределения. Для установок, работающих постоянно (круглогодично), такая тактика может использоваться для значительного снижения эксплуатационных расходов в течение продолжительного периода времени в течение года. Кроме того, такой метод позволяет выполнять преимущественное нагружение более новых (более эффективно работающих) машин.

Рисунок 19 Разделенная система с двумя концами



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Варианты систем охлажденной воды

В подходящих ситуациях могут и должны использоваться различные варианты систем охлажденной воды. Каждая из таких конфигураций обладает рядом преимуществ при разрешении возникающих проблем.

Регенерация тепла

В настоящее время нормы ASHRAE/ESNA 90.1-1999 [1] требуют для определенных условий применения опции регенерации тепла. Требования к качеству воздуха внутри помещения способствуют использованию систем, которые переохлаждают подаваемый воздух, чтобы осушить его. Нормы ASHRAE/ESNA 90.1-1999 ограничивают для таких условий количество энергии перегрева. По этим причинам, а также вследствие стоимости энергии, возобновлено использование чиллеров с регенерацией тепла. Пример, приведенный ниже, иллюстрирует экономически эффективную схему регенерации тепла. Такая схема обычно используется для нагрева воды в отелях и для определенных технологических нагрузок.

Преимущественное нагружение

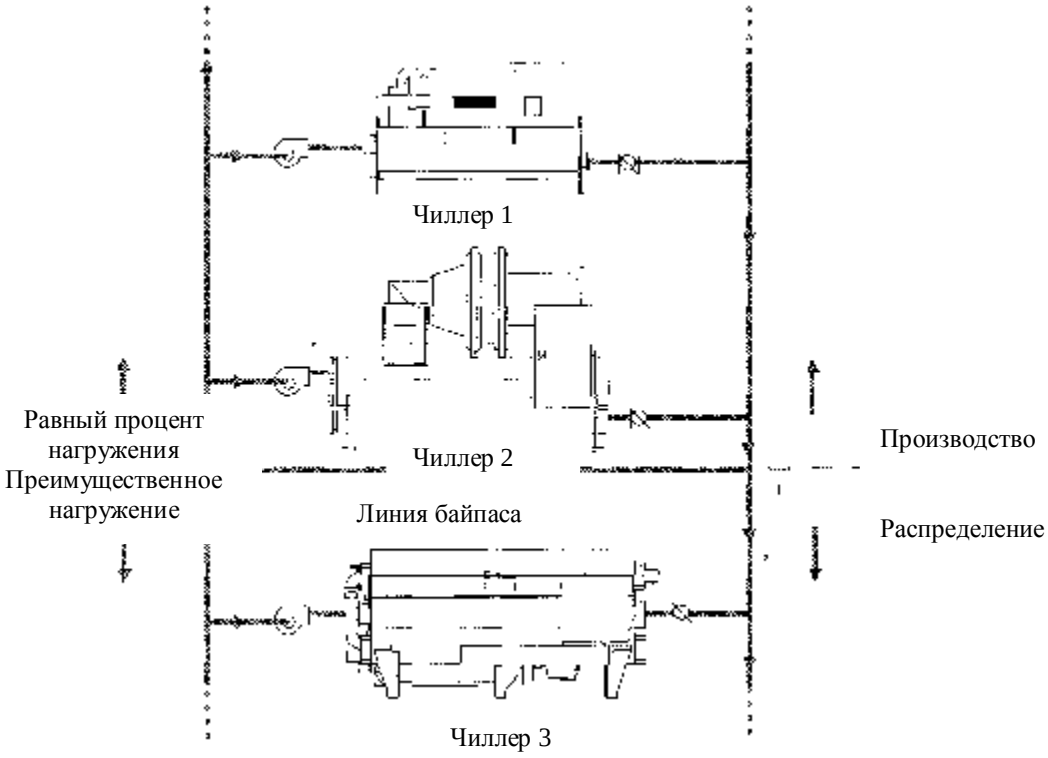
Преимущественное нагружение подходит для систем, в которых используется регенерация тепла, так как чиллер с регенерацией тепла может оставаться более полно загруженным, т.е. производя больше тепла, чем может быть регенерировано. Преимущественное нагружение может быть также успешно использовано для чиллера высокой эффективности, который по возможности должен быть наиболее полно нагружен, или для чиллеров, использующих альтернативные виды энергии, отличные от электроэнергии (например абсорбционный чиллер, использующий отработанный пар электростанции или чиллер, подключенный к электрогенератору). В последнем случае система может выполнять преимущественное нагружение чиллера, работающего на альтернативном виде энергии в ситуации, когда стоимость электроэнергии высока.

Параллельная компоновка

Если чиллер разъединенной системы перемещается на сторону распределения (от линии байпаса), исходя из гидравлики и температур системы при включении этого чиллера будет иметь место его преимущественное нагружение. Как показано на рисунке 20, к чиллеру 1 всегда подается более теплая вода системы и поэтому этот чиллер загружен в большей степени. Как уже было показано ранее, чиллеры, расположенные на производящей стороне от байпасной линии (чиллеры 2 и 3), будут загружены на одинаковый процент.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 20 Параллельная схема преимущественного нагружения



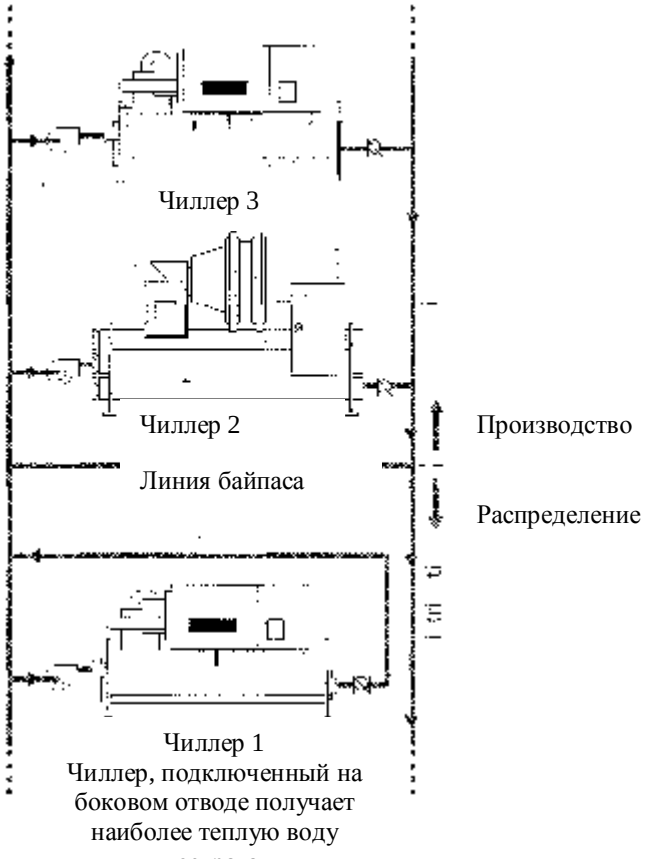
Недостатком такой компоновки является то, что чиллеры, размещенные на стороне производства от линии байпаса, будут более часто работать при условиях низкой частичной нагрузки. Чиллеры более старой конструкции или более новые чиллеры, имеющие высокую точку циклирования, могут не подходить для такого использования.

Компоновка с боковым отводом

На рисунке 21 показана простая модификация традиционной разъединенной схемы. Компоновка с боковым отводом обеспечивает то, что чиллер, подключенный на отводе, будет получать более теплую воду на входе и может быть полностью загружен всякий раз при включении чиллерной установки.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 21 Схема преимущественного нагружения с боковым отводом (последовательно-параллельная схема)



Данная компоновка является уникальной, поскольку она не только позволяет выполнять преимущественное нагружение, но также допускает работу устройства охлаждения (чиллера, теплообменника и т.д.), подключенного на боковом отводе, при любом изменении температуры. В такой схеме выполняется предварительное охлаждение воды возрата системы для чиллеров, размещенных ниже по потоку. Это позволяет снизить нагрузку на эти чиллеры, их энергопотребление и уменьшить суммарные эксплуатационные затраты всей установки охлажденной воды.

Когда устройства охлаждения размещены на трубопроводе возврата в контуре распределения, они не оказывают влияния на требования к расходу. Они просто уменьшают температуру воды, возвращаемой в контур производства. Хотя это противоречит принципу использования воды возврата с самой высокой температурой, изложенному ранее, часто это является оптимальным способом для получения свободного охлаждения применительно к регенерации тепла или для снижения капитальных затрат на сооружение оборудования для хранения льда.

Разъединенные схемы с боковым отводом обычно являются наиболее экономичными, когда чиллер, размещенный на боковом отводе, имеет меньший типоразмер, чем чиллеры на стороне производства от линии байпаса. Поскольку требования к насосной прокачке и

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

энергопотребление именяются при модификцации схемы, для расчета экономического эффекта той и или иной схемы лучше использовать компьютерные программы анализа эффективности.

Ниже рассмотрены три конфигурации различных систем, которые позволяют получить положительный эффект от компоновки с подключением на боковом отводе.

Пластинчатый теплообменник

Теплообменник свободного охлаждения [8] может использоваться для охлаждения воды только до 48°F [8.9°C] в течение ограниченных периодов. Чиллеры, размещенные ниже по потоку, могут обеспечить дальнейшее снижение температуры охлажденной воды, делая возможным одновременное свободное и механическое охлаждение. Данная конфгурация способствует увеличению числа часов, в течение которых может использоваться теплообменник. Поскольку его производительность используется применительно к самой теплой воде системы, он оказывает большое влияние на работу такой системы.

Рисунок 22 Пластинчатый теплообменник

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Регенерация тепла

Аналогичная ситуация наблюдается и в том случае, когда чиллер с регенерацией тепла размещен на боковом отводе [5] (см. рисунок 22). Этот чиллер может быть оборудован конденсатором регенерации тепла или он может быть стандартным чиллером, оборудованным одним конденсатором и работающим в режиме теплового насоса. Чиллер может не справляться с требованием охлаждать воду до требуемой температуры подачи системы. Но в данной конфигурации это - неважно. Вместо чиллера может использоваться нагреватель. Его основной задачей будет нагрев, а охлаждение будет вторичным процессом. Проходящий поток воды возврата будет выполнять роль источника тепла для чиллера с регенерацией тепла. Чиллер будет только охлаждать воду, проходящую через его испаритель в достаточной степени, чтобы покрыть нагрузку по нагреву. Это исключит возникновение проблем с регулированием при решении вопроса, каким образом "снять" избыток тепла в конденсаторе в ситуации, когда нагрузки охлаждения и нагрева чиллера не дают точного совпадения теплового баланса.

Абсорбционный чиллер

Абсорбционный чиллер также может быть размещен на боковом отводе. Это позволяет выполнять нагружение этого чиллера всякий раз, когда вследствие изменения стоимости электроэнергии работа этого чиллера становится выгодной. Такая схема также позволяет использовать для этого чиллера воду с наиболее теплой температурой на входе, что делает режим работы этого абсорбцинного чиллера наиболее эффективным и позволяет производить больше охлаждения.

Регулирование системы

Гибкость применения схем с подключением на боковом отводе обусловлена тем, что устройства, используемые для предварительного охлаждения воды возврата, не производят охлажденную воду с требуемой температурой подачи для системы. Это означает, что их нагружение может выполняться с помощью различных сигналов. В случае пластинчатого теплообменника это означает, что есть смысл использовать его до тех пор, пока вода возврата будет охлаждаться. Чиллер с регенерацией тепла может нагружаться для производства определенного количества горячей воды. В качестве сигнала регулирования в этом случае может использоваться температура воды на выходе конденсатора. Если преимущественное нагружение используется для абсорбционного чиллера, он может нагружаться просто при снижении температуры воды на выходе.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Использование чиллеров различного тиоразмера

Многие разработчики считают, что "по умолчанию" в установке охлажденной воды используются чиллеры равного типоразмера [2,3]. Выбор типоразмера чиллеров в зависимости от нагрузки системы приносит определенные выгоды. В общем случае, если к нагрузке подключается определенный чиллер, одновременно включается и вспомогательное оборудование этого чиллера. Чем меньше типоразмер самого чиллера, тем меньше и типоразмер его вспомогательного оборудования. С другой стороны, необходимо обеспечить эффективное нагружение чиллеров. Во многих случаях эти может быть обеспечено путем использования чиллеров, которые не имеют одинаковой производительности. Рассмотрим систему 60/40 (один чиллер на 60 процентов производительности системы, а другой на 40) или систему 1/3 - 2/3 (один чиллер на 1/3 производительности системы, а другой на 2/3). Преимуществом такой системы является то, что производительности чиллера может более точно соответствовать нагрузке системы, что позволяет повысить общую энергоэффективность системы.

Последовательно-противоточная схема

Примером еще одной конфигурации, которая может быть очень эффективной, является рассмотренная ранее последовательная конфигурация, которая, однако, не применяется одновременно к охлажденной воде и воде конденсатора. На рисунке 23 показана такая конфигурация.

Обратите внимание на то, что машина, размещенная ниже по потоку, производит охлажденную воду с температурой 40°F [4.4°C], а включенная выше машина производит охлажденную воду с температурой 50°F [10°C]. Машина, размещенная ниже по потоку, получает воду конденсатора с температурой 85°F [29.4°C], а включенная выше машина получает воду конденсатора с температурой 95°F [35°C]. Поэтому на стороне охлажденной воды требуемый расход составляет 1.2 (гал/мин)/тонну, а на стороне воды конденсатора требуемый расход составляет 1.5 (гал/мин)/тонну, что позволяет существенно сократить расходы на работу насосов.

Последовательно-противоточная конфигурация может хорошо работать для всех типов чиллеров. На рисунке 23 показаны сдвоенные чиллеры. Большой одиночный чиллер может быть сконфигурирован, как сдвоенная машина. Контуры циркуляции воды испарителя и конденсатора являются общими для обеих половинок сдвоенной машины. Увеличение эффективности обусловлено разделением контуров компрессоров и хладагента. Таким образом, каждая половина используется в качестве резерва, повышая надежность всей системы.

В такой конфигурации перепады температур на каждом из чиллеров равны (см. рисунок 23а). Потоки охлажденной воды и воды конденсатора направлены в противоположных направлениях. Это и дало название конфигурации - "последовательно-противоточная".

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 23 Последовательно-противоточная конфигурация

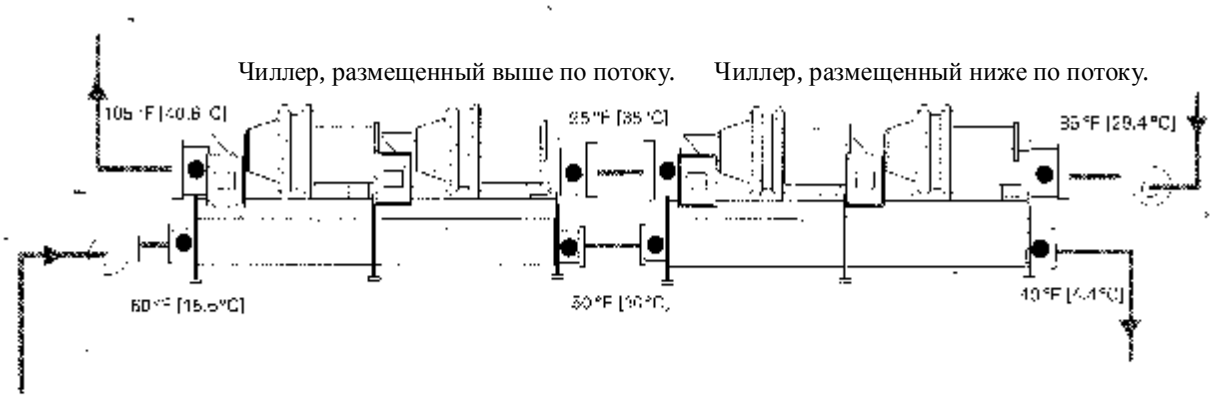
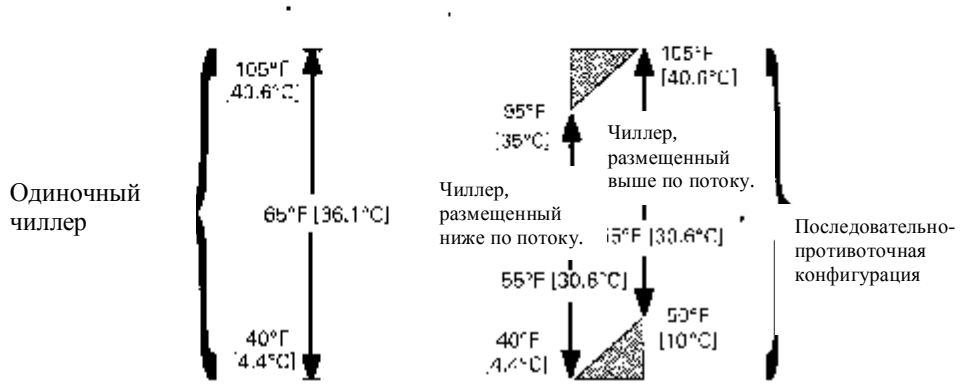


Рисунок 23а Концепция равного температурного перепада



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

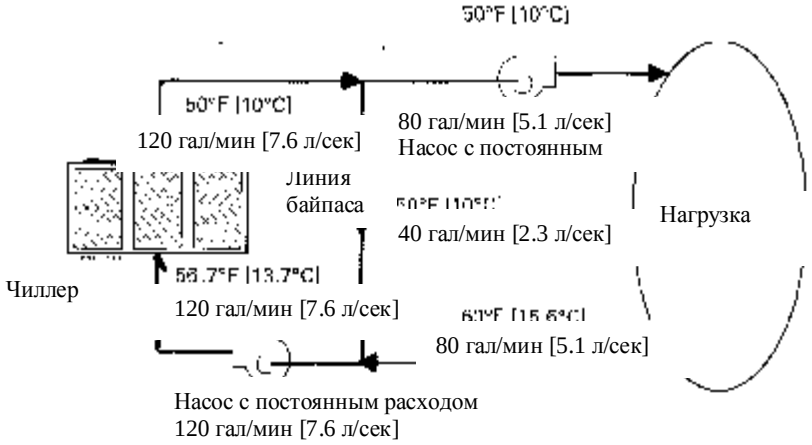
Работа при параметрах, выходящих за диапазон граничных значений чиллера

Проектировщики могут захотеть использовать чиллеры для охлаждения при таких требованиях к расходам или температурам, которые лежат вне диапазона допустимых значений для конкретного чиллера (даже если чиллер имеет нужное значение производительности). Рассмотрим два примера, иллюстрирующих конструкцию систем, которые могут удоволетворять поставленным требованиям.

Расход находится вне допустимого диапазона

Технологический процесс изготовления пластмассовых шприцев требует 80 гал/мин [5.1 л/сек] воды с температурой 50°F [10 °C]. Вода возвращается с температурой 60°F [15.6 °C]. Выбранный чиллер может работать при таких температурах, но имеет минимальный расход 120 гал/мин [7.6 л/сек]. Для такого процесса может использоваться схема, показанная на рисунке 24. Отделение чиллера от нагрузки технологического процесса позволяет изменить расход воды, обеспечивая поддержание расхода через чиллер в допустимых пределах. Для системы с одиночным чиллером такой же эффект получается при использовании одного насоса и трехходового клапана.

Рисунок 24 Величина расхода выходит за диапазон граничных значений для данного типа оборудования



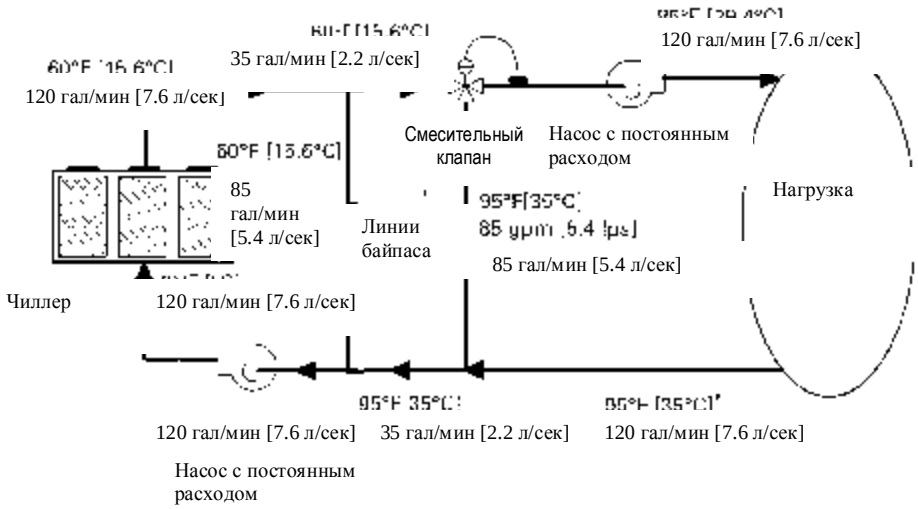
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Температура выходит зо допустимый диапазон

Для лаборатории требуется 120 гал/мин [7.6 л/сек] воды с температурой на входе 85°F [29.4 °C]. Вода возвращается из лаборатории с температурой 95°F [35 °C]. Требуемая точность поддержания температуры превышает точность, которая может быть обеспечена градирней. Выбранный чиллер имеет нужную производительность, но максимальная допустимая температура охлажденной воды на выходе для него составляет 60°F [15.6 °C].

Использование пары байпасных трубопроводов позволяет подавать к нагрузке через смесительный клапан воду с требуемой температурой и поддерживать расход и температуру воды на чиллере в допустимых границах. Пример такой схемы показан на рисунке 25. На этой схеме расходы через чиллер и на нагрузке равны, хотя это и не является обязательным требованием. Например, если бы чиллер имел более высокий расход, больше воды направлялось через байпас и смешивалось с теплой водой возврата.

Рисунок 25 Температура выходит за диапазон граничных значений для данного типа оборудования



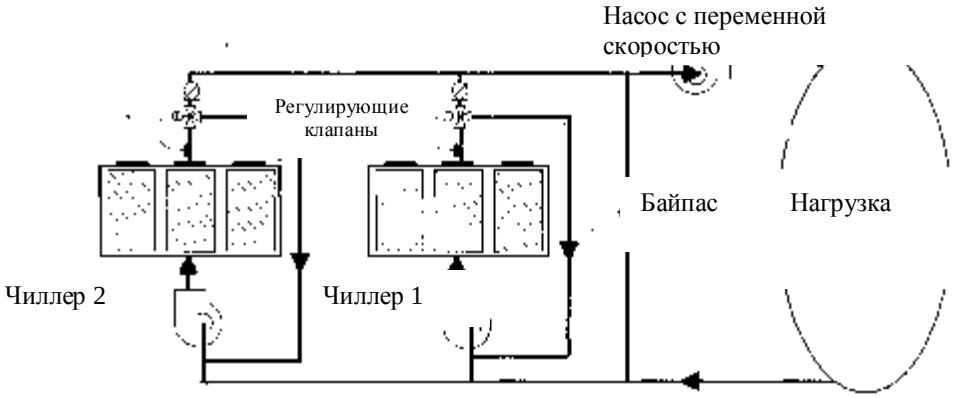
Пример схемы, в которой требования к точности поддержания температуры более высокие, чем это могут обеспечить регуляторы чиллера, показан на рисунке 26.

Например, если включен чиллер 2, необходимо определенное время, чтобы температура воды на подаче достигла заданного значения уставки. Специальный регулирующий клапан остается закрытым (вода байпасируется) до тех пор, пока чиллер 2 не достигнет значения своей уставки. Это позволяет поддерживать температуру подаваемой воды с заданной точностью. Когда чиллер 2 достигнет своего значения уставки, открывается регулирующий клапан.

Такая схема требует использования несколько иной логики регулирования последовательности работы чиллеров, чем логика регулирования, используемая в стандартных разделенных системах. Вода не должна попадать по байпасу со стороны возврата на сторону подачи, так как это приведет к выходу температуры воды на подаче за допустимые границы точности. Регуляторы системы должны включить чиллер до того, как будет иметь место "дефицит" расхода.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 26 Прецизионное регулирование температуры - система, состоящая из нескольких чиллеров



Литературые ссылки

1. *BSR/ASHRAE/IESNA 90.1-1999,* "Energy standard for buildings except low-rise residential buildings," Illuminating Engineering Society of North America and American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1999.

2. Eppelheimer, D., RE. and Bradley, B.; "Chilled-Water Plants and Asymmetry as a Basis of Design" *Engineers Newsletter,* Volume 28, No. 4, The Trane Company, October 1999.

3. Landman, W. and Bradley, B.; "Off-Design Chiller Performance" *Engineers Newsletter*. Volume 25, No. 5, The Trane Company, December 1996.

4. Trane Applications Engineering Group, "A New Era of Free Cooling", *Engineers Newsletter,* Volume 20, No. 3, The Trane Company, 1991.

5. Trane Applications Engineering Group, "Two Good Old Ideas Combine to Form One New Great Idea" *Engineers Newsletter,* Volume 20, No. 1, The Trane Company, 1991.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Спорные вопросы при проектировании систем охлажденной воды

Синдром малого значения ΔT

В течение ряда последних лет активно обсуждаеся вопрос "синдрома низкой ΔT". Проблема заключается в том, что в больших системах температура воды на возврате слишком низкая и поэтому чиллеры не могут быть полностью загружены. Многие операторы просто включают большее число чиллеров, чтобы выполнить требования по расходу. Некоторые проектировщики используют обратный клапан на линии байпаса, что приводит к последовательной схеме включения насосов первого и второго контуров и изменению расхода через испарители чиллеров. Другие проектировщики используют в первом контуре насосы большей производительности, чем это необходимо, и "перезакачивают" чиллеры в условиях частичной нагрузки. Все эти решения являются "обходными" и не затрагивают самого источника проблемы.

В работе Кода [2] указывается на тот факт, что правильно эксплуатируемая гидравлическая система будет работать на проектных параметрах, и поясняется ошибочность подходов использования обратного клапана и "перезакачки". Тэйлор [5] рекомедует ряд операций, которые позволят исключить возникновение проблем. Они включают в себя:

- исключение трехходовых клапанов
- обеспечение отсутствия проблем с регулированием на воздушной стороне
- правильное техническое обслуживания системы, включающее регулярную замену фильтров очистки воздуха, очистку теплообменников, калибровку регуляторов и правильное задание уставок.

Перед тем как использовать "обходные" подходы для решения определенных проблем (таких, как "синдром низкой ΔT"), проверьте, что обеспечен нормальный режим эксплуатации и использованы все операции, рекомендованные Тэйлором [5]. Кроме того, в системах, использующих двухходовые клапаны, простое снижение температуры подачи охлажденной воды будет иметь эффект увеличения температуры воды возврата системы.

Обратный клапан на линии байпаса

Чтобы исключить возможный "дефицит" расхода в линии байпаса, некоторые проектировщики рекомендуют смонтировать обратный клапан на линии байпаса разделенных (первично-вторичных) систем. Такой обратный клапан позволяет при возникновении проблемы в системе (малый дифференциал температур) включать насосы первого и второго контуров последовательно и прокачивать больше воды через чиллер, выполняя требования по поддержанию требуемых расходов в первом и втором контурах. Такое решение не является универсальным. Код [2] указывает:

> "Если система запроектирована как система с переменным расходом и в ней имеют место эксплуатационные проблемы, связанные с низкими температурами на

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

возврате, решение этих проблем должно выполняться не на установке, а на нагрузке."

и

" Предлагается решение смонтировать обратный клапан в общем трубопроводе установки или в контуре линии разъединения ... Однако, на самом деле, все, что может сделать обратный клапан, это - обеспечение того, что вода не будет байпасировать чиллеры, что, в свою очередь, приводит к увеличению расхода в чиллере. Таким образом при монтаже обратного клапана должен использоваться или алгоритм замедления работы насоса(ов) системы в тех ситуациях, когда расход на чиллере возрастает выше максимального проектного значения, или включения дополнительных чиллеров. Таким образом использование для решения проблемы обратного клапана создает дополнительные проблемы и многие проектировщики чувствуют себя очень дискомфортно, включая насосы последовательно и не понимая преимуществ такого решения".

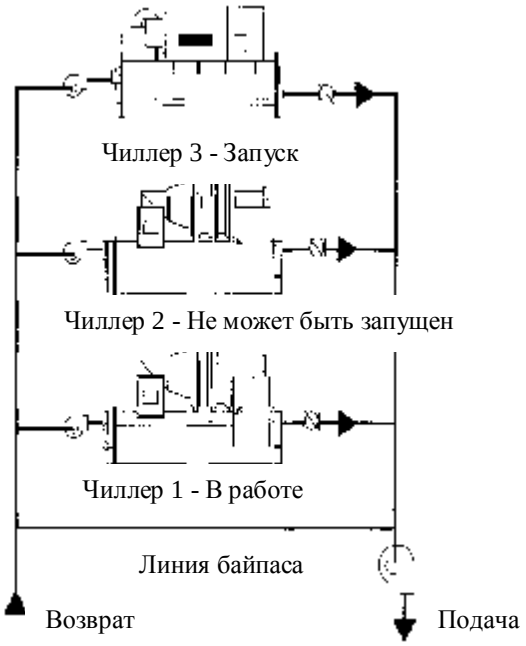
Данное руководство не рекомендует использование обратных клапанов на линии байпаса.

Устранение отказов

При всем многообразии используемых подходов, имеющихся в распоряжении потенциальных заказчиков, иногда кажется, что теряется основная идея. Люди покупают установки охлажденной воды, чтобы надежно производить охлажденную воду. Поэтому, когда установка находится в работе, должны быть предусмотрены средства для устранения отказов, связанных с работой насоса охлажденной или конденсаторной воды, градирни или чиллера. Логика устранения отказов должна быть интегрирована в систему регулирования установки по производству охлажденной воды. Рассмотрим рисунок 27. Если логика последовательности (программа) регулирования пытается запустить чиллер 2 и его насос, но имеются неисправности в электрической части насоса, программа должна незамедлительно заблокировать чиллер 2 и его насос. После этого система регулирования должна попытаться запустить чиллер 3 и его насос. Одновременно система регулирования должна направить оператору системы предупреждающее сообщение об отказе в насосе.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 27 Устранение отказов



Альтернативные источники энергии

Вопрос резервирования источника энергии привлекает к себе все больше внимания в связи с варьированием цен на электроэнергию и несогласованностью действий энергокомпаний внутри страны. Для решения этого вопроса используются два основных подхода:

- Обеспечение альтернативного источника электроэнергии для обслуживания системы в случае общего отказа сети электропитания или неприемлемо высокой стоимости электроэнергии (во время дневных пиковых нагрузок).

- Обеспечение альтернативного источника по производству охлажденной воды, возможно, использующего при работе природный газ или другой тип органического топлива, или даже использование дешевой электроэнергии в качестве альтернативного источника энергии.

Производство электроэнергии

Электрогенерирующие мощности могут подбираться или для обеспечения электропитания всей установки или для аварийного электропитания. Чтобы исключить внутреннюю капитализацию, электрогенерирующие источники могут быть разнесены.

Альтернативные виды топлива

Некоторые проектировщики предпочитают использовать чиллеры, работающие на органическом топливе. Примерами этого являются абсорбционные чиллеры, работающие на

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

газе, или использующие пар или горячую воду. Установки, оборудованные чиллерами такого типа и более подробно рассмотреные в работе [4], позволяют собственнику оборудования использовать преимущества постоянно ожидаемой тарификации стоимости топлива.

Термическое хранение

Другим методом успешного применения альтернативных источников энергии является термическое хранение. Чиллеры производят лед или охлажденную воду в периоды низкой стоимости электроэнергии. Этот лед (энергия) накапливается в баках, а затем используется для покрытия нагрузки охлаждения в периоды высокой стоимости электроэнергии. Более подробно вопросы термического хранения рассмотрены в работах [6,7,8,9].

Непредвиденные объстоятельства

В дополнение к стратегии устранения отказов можно порекомендовать проектировщикам холодильных установок разработку совместно с собственником здания плана действий в случае аварийного останова или крупной поломки. Часто такие ситуации являются критичными для технологического охлаждения. Такой план может включать работу с поставщиками по определению краткосрочного лизинга оборудования. Если лизинг оборудования комбинируется с использованием трубных отводов, предумотренных в системе охлажденной воды и обеспечивающих быстрое подключение взятого в лизинг оборудования, работоспособность установки может быть восстановлена в течение короткого периода времени.

План действий в непредвиденных обстоятельствах применительно к системам охлаждения

В настоящее время многие фирмы разрабатывают планы действий в непредвиденных обстоятельствах для критичных сфер своего бизнеса. Некоторые рассматривают случаи природных катаклизмов, другие - отключение мощностей в критичных зонах. Однако совсем немногие действительно находят время, чтобы продумать, что будет означать для объекта отсутствие охлаждения. Что произойдет, если полностью откажет система охлаждения или внезапно резко изменятся погодные условия? Каким образом это повлияет на бизнес? С какими финансовыми рисками сопряжено отсутствие охлаждения.

Планирование действий в непредвиденных обстоятельствах применительно к системам охлаждения выполняется с целью минимизировать те потери предприятия, которые могут иметь место в случае полного или частично отказа системы охлаждения. Такой план позволяет собственникам зданий действовать более оперативно в критичной ситуации и заранее подготовиться к приему временного оборудования. Хотя ряд предприятий готовится к таким событиям после завершения этапа сооружения, именно этап сооружения позволяет просто и без больших затрат подготовить объект к таким событиям. Логично, именно в это время, предусмотреть отводы для подключения воды и электропитания. Это помогает сократить расходы и снижает необходимость останова существующего оборудования для выполнения необходимых подготовительных операций.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Планирование действий в непредвиденных обстоятельствах применительно к системам охлаждения - это процесс подготовки к отсутствию охлаждения, выполняемый в неаварийной ситуации. Это позволяет действовать в критичной ситуации разумно и не поддаваться панике. Ниже рассмотрены общие темы такого плана. Они поясняют смысл, вкладываемый в процесс планирования. Сам процесс планирования действий в непредвиденных обстоятельстах является очень специфичным и зависит от конкретной ситуации.

Минимальная требуемая производительность.
Для начала важно определить, какая минимальная производительность требуется. Возможно, что в аварийной ситуации для систем, состоящих из нескольких чиллеров, разумно будет иметь меньшую производительность. Например, номинальная производительность чиллерной установки составляет 1800 тонн [6330 кВт], но минимальная требуемая производительность может составлять только 1200 тонн [4220 кВт]. Важно также определить план действий в ситуации, если отказал чиллер 1, отказал чиллер 2, отказали чиллеры 2 и 3 и т.д.

Тип и типоразмер чиллера.
Требуемые для объекта в аварийной ситуации тип и типоразмер чиллера зависят от нескольких факторов. С другой стороны, выбор такого чиллера определяет, насколько объект подготовлен к такой ситуации. Примерами параметров, определяющих тип и типоразмер чиллера, являются:

- Электротехнческие требования
- Простота монтажа (чиллеры с воздушным охлаждением конденсатора легче сконфигурировать)
- Имеющиеся площади для размещения
- Является ли охлаждение комфортным или технологическим

Размещение оборудования:
Место для размещения может быть основным фактором при планировании. При выборе места для размещения временного оборудования важно учитывать следующее:

- Расположение точек подключения воды и электропитания
- Чувствительность зон объекта к шумовым нагрузкам
- Простота доступа для сервисного персонала
- Недоступность оборудования для публики

Подключение воды и электропитания

- Требования к размерам патрубков подключения воды
- Расположение внешних отводов
- Наличие достаточной мощности для запуска временного оборудования
- Требования к возможному генератору

Вспомогательное оборудование

- Требования к насосной системе
- Требования к временным шлангам
- Требования к электрокабелям.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

В данном разделе рассмотрены только общие аспекты выработки плана действий в непредвиденных обстоятельствах применительно к системам охлаждения. Помните, что в зависимости от конкретной ситуации могут появиться и другие факторы.

Литературные ссылки:

1 Avery, G,, P.E.; "Controlling Chillers in Variable-Flow System" *ASHRAE Journal,* February 1998. pp. 42-45.

2 Coad, W.J., P.E.; "A Fundamental Perspective on Chilled-Water Systems" *Heating/Piping/Air Conditioning*. August 1998, pp. 59-66.

3 Kirsner, W.; "The Demise of the Primary-Secondary Pumping Paradigm for Chilled-Water Plant Design" *Heating/Piping/Air Conditioning,* November 1996.

4 Schwedler, M., PE and Brunsvold, D., Absorption Chiller System Design, SYS-AM-13, The Trane Company, May 1999.

5 Taylor, S. T; "Degrading Delta-T in New and Existing Chilled Water Plants, *Cool Sense National Forum on Integrated Chiller Retrofits,* Lawrence Berkeley National Laboratory and Pacific Gas & Electric, September 1997.

6 Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding Its Economics," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-1, The Trane Company, 1991.

7 Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding the Choices," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-2, The Trane Company, 1991. •

8 Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding System Design," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-3, The Trane Company, 1991.

9 Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage-Understanding Control Strategies," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-2, The Trane Company, 1991.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Варианты конденсаторных систем

Чиллеры с водным охлаждением конденсатора требуют анализа систем водного охлаждения конденсатора. Вопросы температур и расходов воды конденсатора были рассмотрены в разделе "Основные принципы работы установок по производству охлажденной воды". Поскольку вопросы регулирования процессов в конденсаторе для чиллеров с воздушным охлаждением конденсаторов относятся к конструкции чиллера, они не рассматриваются в данном издании.

Чтобы обеспечить оптимальность процесса теплообмена на теплопередающих поверхностях конденсатора, эти поверхности должны поддерживаться в чистом состоянии: на них должны отсутствовать отложения накипи и шлама. Наличие даже тонкого слоя накипи может привести к существенному снижению интенсивности процесса теплопередачи и снижению эффективности работы чиллера. Специальные вопросы обработки воды градирен не рассматриваются в данном издании. Чтобы определить требуемый тип водоподготовки и удаления из охлаждающей воды градирни примесей, получите консультацию квалифицированного специалиста по водоподготовке.

Конфигурации схем подключения конденсатора

Очень важно, чтобы во входном патрубке насоса был обеспечен положительный напор. Очень часто это обеспечивается путем размещения насоса на уровне ниже поддона-сборника градирни.

Одна градирня на каждый чиллер

В некоторых схемах каждый чиллер имеет свою собственную градирню. Наиболее часто такая конфигурация используется в тех ситуациях, когда чиллеры и их градирни покупаются в различное время срока работы установки.

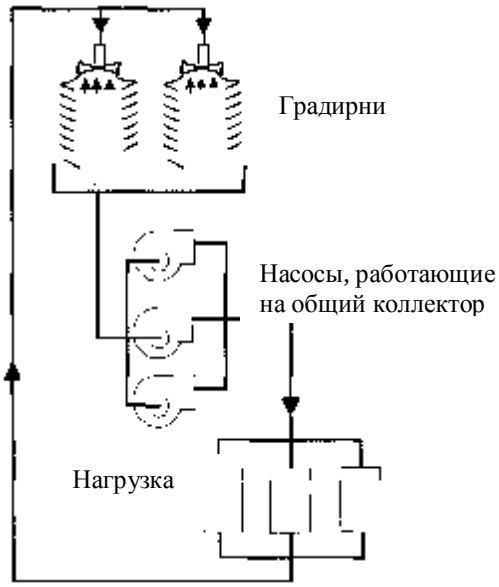
Конденсаторные насосы, работающие на общий коллектор

Наиболее широко используется схема с одним общим поддоном градирни и насосами, работающими от одного общего коллектора. Такая схема использует одну линию воды конденсатора и раздельные трубы меньшего размера для каждого чиллера (см. рисунок 28). Такая схема обладает рядом преимуществ:

- Резервирование работы насосов
- Если градирни могут быть отсечены, любая из оставшихся в работе градирен может работать в паре с любым из чиллеров.
- Гидравлически такая схема значительно проще, чем схема по стороне охлажденной воды.
- Градирни могут быть размещены на определенном расстоянии от чиллеров. Для их подключения требуется только одна труба подачи и возврата.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 28 Схема трубопроводов насосов воды конденсатора, работающих на общий коллектор



Регулирование работы конденсатора при переходных процессах (неустановившихся условиях)

Чтобы обеспечить работу каждого чиллера требуется поддержание определенного перепада давлений между испарителем и конденсатором. Чиллер должен создавать этот перепад (дифференциал) давлений за период времени, гарантированный изготовителем. В противном случае система регулирования должна отключить его. Для некоторых условий применения может быть сложным обеспечить такой перепад давления за период времени, лежащий в ограниченном диапазоне.

Примером таких условий может быть офисное здание, в котором отсутствует персонал в холодные и ясные выходные дни. Вода в поддоне градирни находится при температуре 40°F [4.4°C]. В понедельник - погода солнечная и теплая. При такой погоде чиллер должен быть включен. Поскольку чиллер нагружен слабо и объем поддона градирни - большой, перепад давлений не может быть достигнут до момента выключения чиллера. Если бы для данного чиллера можно было бы снизить расход воды через конденсатор, такой сценарий событий был бы маловероятен. Снижение расхода воды через конденсатор приводит к росту температуры воды на выходе конденсатора, росту температуры хладагента в конденсаторе и росту давления хладагента.

Возможны следующие опции снижения расхода:

- байпас градирни
- байпас чиллера
- использование одного или двух дроссельных клапанов на линии конденсаторной воды (перемещение рабочей точки насоса по рабочей характеристике)
- насос воды конденсатора с переменной скоростью вращения.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Когда достигнут минимальный перепад давления, расход может быть увеличен таким образом, чтобы поддерживался этот минимальный перепад. Некоторые проектировщики и операторы считают, что такие условия запуска могут привести к загрязнению труб конденсаторной воды. Однако это маловероятно в течение короткого периода режима работы на пониженном расходе, используемого достаточно редко. Преимущества и недостатки указанных опций рассматриваются в публикациях [1,5].

Методы регулирования вентиляторов градирни

Режим работы градирен организовывается таким образом, чтобы получить воду в поддоне с определенной температурой. При изменении теплосъема и изменении температуры наружного воздуха по влажному термометру вентиляторы градирни должны прокачивать больше или меньше воздуха, чтобы обеспечить требуемое значение температуры воды.

Циклирование (включение/отключение) вентилятора

Включение/выключение (циклирование) одиночного вентилятора с одной скоростью вращения является одним из методов обеспечения регулирования температуры воды. Поскольку расход воздуха изменяется, при изменении скорости вращения вентилятора, изменяется и отводимое количества тепла. Температура может колебаться от 7°F до 10°F [3.9°C до 5.6°C]. Некоторые чиллеры особенно старшего поколения, оборудованные пневматическими регуляторами, могут работать неустойчиво при таком изменении температуры. Особое внимание необходимо обратить на то, чтобы включение/выключение вентилятора выполнялось не слишком часто. Такое частое включение/выключение может вызвать поломку электродвигателя, привода или вентиляторного блока.

Двухскоростные вентиляторы

Для снижения колебаний температуры часто используются градирни с двухскоростными вентиляторами. Обычно низкая скорость вращения вентилятора составляет от 50 до 70 процентов от полной скорости вращения. Поскольку теплосъем изменяется приблизительно пропорционально скорости, колебания температуры при таком методе будут составлять только 50-75 процентов от колебаний, имеющих место при циклировании одиночного вентилятора. В этом случае также должно быть исключено слишком частое переключение скоростей - коробка передач может подвергнуться избыточному износу и отказать. Определенным преимуществом двухскоростных вентиляторов является то, что при работе на низкой скорости существенно снижается потребляемая мощность вентилятора. Поскольку функция зависимости потребляемой мощности вентилятора от скорости вращения является кубической (приблизительно), при работе на половинной скорости потребляемая мощность составляет около 15 процентов от мощности, потребляемой при полной скорости вращения.

Дополнительные (вспомогательные) электродвигатели небольшой мощности

Производители градирен предлагают еще одну опцию: иметь два отдельных электродвигателя для привода вентилятора. Электродвигатель меньшей мощности часто называют "пони"-мотором. Он работает на скорости, составляющей две трети от полной скорости вращения и потребляет около 30% от мощности при полной скорости. При регулировании работы градирни важно минимизировать частоту переключения между скоростями.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Приводы с переменной скоростью вращения

Использование приводов с переменной скоростью для вентиляторов градирни дает два значительных преимущества. Во-первых, значительно улучшается регулирование температуры воды градирни. Во-вторых, поскольку функция зависимости потребляемой мощности вентилятора от скорости вращения является кубической, это дает большое сокращение энергопотребления. Приводы с переменной скоростью также позволяют выполнять изменение скорости вращения без износа зубчатой передачи и электродвигателя. Использование таких приводов дает также преимущества в акустике, так как снижение скорости вращения сопровождается существенным снижением уровня звуковой мощности.

Пластинчатый теплообменник

Как уже было показано ранее в разделе "Опции системы охлажденной воды", пластинчатый теплообменник может использоваться совместно с градирней для обеспечения охлаждения при условиях очень низкой температуры наружного воздуха по влажному термометру. При использовании для таких целей проектировщики часто делают градирню несколько большей, чем это требуется по проектным условиям - таким образом, чтобы она могла использоваться в течение многих часов при работе с пластинчатым теплообменником.

Артензианская вода, речная и озерная вода

Существуют ситуации, когда через конденсатор прокачивается артезианская, речная или озерная вода. В таких случаях необходимо провести анализ, чтобы сбалансировать стоимость прокачки воды с премуществом того, что чиллер получает больший расход воды через конденсатор. С другой стороны существуют экологические ограничения (нормативные документы, действующие на объекте). Некоторые надзорные органы не разрешают сброс воды после использования. Другие административные органы ограничивают максимальную температуру сброса воды в природные водоемы. Необходимо провести тщательный анализ расходов, чтобы сбалансировать экономические и экологические требования.

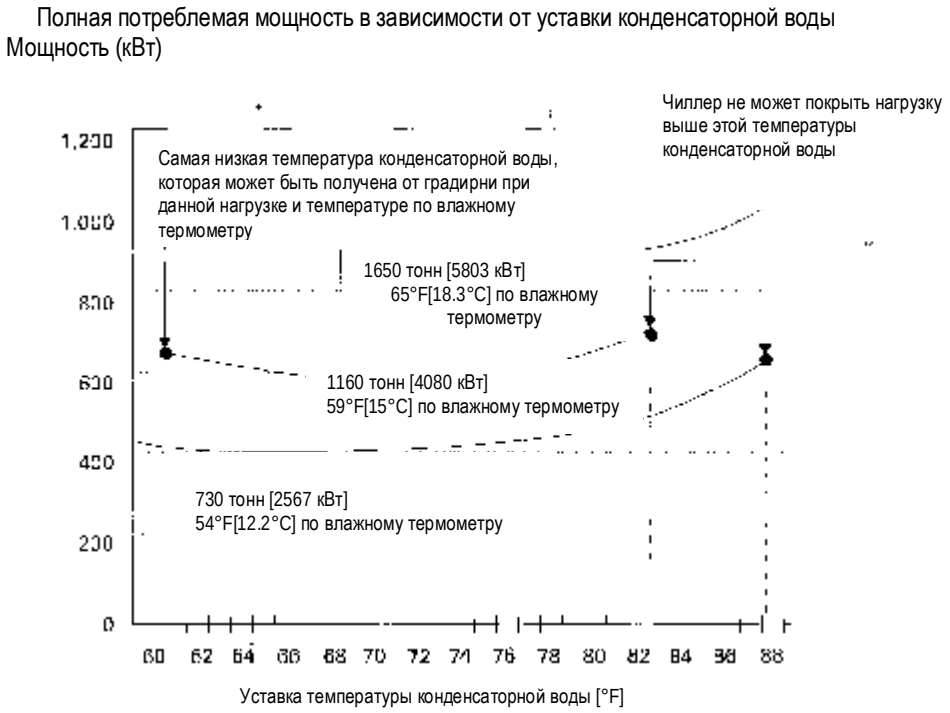
Регулирование температуры воды конденсатора

Вопрос регулирования температуры конденсаторной воды изучался во многих работах. В последние годы Браун и Диддерих [2], Хайдеман, Джиллестай и Каммеруд [3], а также Шведлер [4] независимо друг от друга показали, что важное значение имеет балансирование энергий, потребляемых чиллером и градирней. В работах Хайдемана было показано, что при различных нагрузках и условиях состояния наружного воздуха оптимальная температура воды конденсатора для конкретной чиллерной установки зависит как от нагрузки чиллера, так и от состояния наружного воздуха (см. рисунок 29). Все авторы показали, что для многих режимов работы оптимальными условиями является отнюдь не самая низкая температуры воды, которую позволяет получить градирня. Для проектировщиков и операторов системы важно изучить использование регуляторов уровня системы, чтобы настроить уставку температуры воды в поддоне-сборнике градирни таким образом, чтобы снизить сумму энергии,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

потребляемой чиллером и градирней. Оптимизация регулирования чиллер-градирня может быть автоматизирована с помощью системы управления чиллерной установкой.

Рисунок 29 Оптимизация работы чиллера-градирни



Опции насосов воды конденсатора

Баланс чиллер - насос

Бывают ситуации, когда проектировщик может выбрать опцию изменения расхода воды через конденсатор дополнительно или взамен опции изменения скорости вращения вентилятора градирни. Это может быть выгодно в системах с высокой потребляемой мощностью на насосную прокачку. Если смонтирован привод с переменной скоростью вращения, расход может быть сокращен и существенно снижена мощность, потребляемая насосом (кубическая зависимость). Попытки одновременного изменения скоростей насоса и вентилятора приводят к усложнению системы и требуют соответствующего времени на проектирование и внедрение.

Ограничения изменения расходов

Особое внимание необходимо обратить на то, чтобы поддерживать расход воды через конденсатор на уровне выше минимального допустимого значения для конденсатора данного чиллера. Оператор должен регулярно регистрировать температурное приближение в конденсаторе (разность между температурой хладагента в конденсаторе и температурой воды на выходе конденсатора), чтобы исключить загрязнение трубчатки. Температурное приближение может контролироваться с помощью системы управления оборудованием чиллерной установки.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

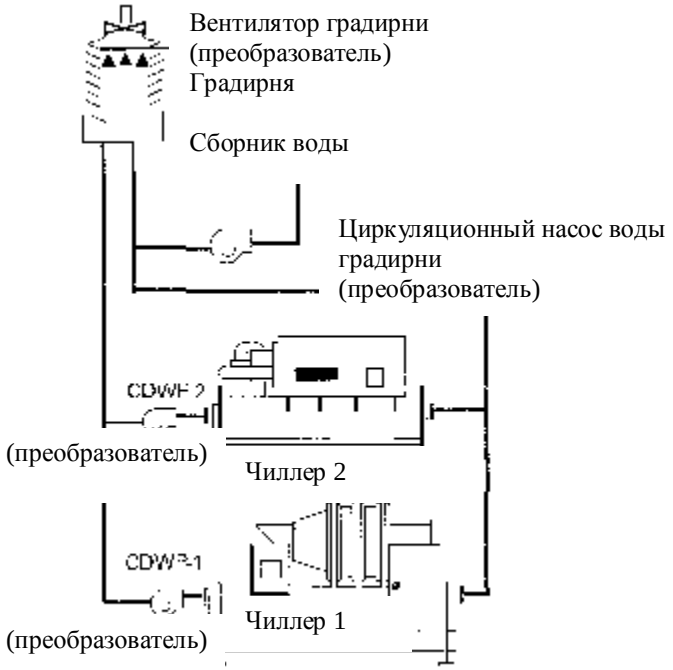
Конструкция градирни и/или разбрызгивающих насадок градирни может оказывать влияние на допустимую величину расхода воды через конденсатор. Если расход снижается ниже предела, указанного изготовителем, не может быть организовано эффективное распределение воды на загрузке градирни. Это приводит к снижению эффективности процессов теплообмена в градирне. В экстремальных ситуациях это может привести к замерзанию воды в градирне. Если рассматривается возможность использования переменного расхода, свяжитесь с изготовителем градирни и определите границу расхода и требуемую конфигурацию разбрызгивающих насадок или самой градирни, которая может обеспечить работу при переменном расходе.

Разъединенная система конденсаторной воды

Чтобы исключить возможные проблемы с переменным расходом воды градирни, некоторые проектировщики разделяют систему конденсаторной воды (см. схему на рисунке 30). Такая компоновка позволяет оптимизировать потребление энергии путем снижения мощности, затрачиваемой на насосную прокачку, без сильного усложнения системы. Поскольку градирня лучше всего работает при полном расходе воды через материал заполнения, отдельный рециркуляционный насос обеспечивает постоянный расход воды через градирню. Это - очень маломощный насос, так как требуемый напор - очень небольшой.

Использование двух отдельных конденсаторных насосов (CDWP-1 и CDWP-2) позволяет снизить энергию на работу насосов всякий раз, когда температура конденсаторной воды приводит к непродуктивному снижению давления хладагента в конденсаторе. Хотя использование нескольких раздельных насосов может показаться на первый взгляд сложным, вспомните о числе клапанов и регуляторов, которые они позволяют исключить.

Рисунок 30 Разъединенная система циркуляции воды через конденсатор



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Возможности модернизации

Владельцам зданий может потребоваться увеличение производительности существующей системы (например при достройке здания). Во многих таких зданиях система конденсаторной воды (трубопроводы, насос и градирня) находится в хорошем состоянии, но часто предполагается, что ее производительность будет недостаточной (слишком мала). Путем изменения традиционных проектных решений существующая инфраструктура может быть часто использована, обеспечивая при этом дополнительную производительность.

Помните, что градирня не ограничивает заданное значение холодопроизводительности. Градирня представляет собой теплообменник, который выполняет передачу тепла между водой (с температурой на входе) и наружным воздухом (температура по влажному термометру). Путем изменения расхода или температуры производительность градирни может быть изменена (часто увеличена). Ниже показан пример, иллюстрирующий это положение.

Пример
Больница была оборудована чиллером с производительностью 450 тонн [1580 кВт], который необходимо заменить. Расход воды в конденсаторе составляет 1350 гал/мин [85.2 л/сек]. Условия для выбора градирни:

- температура воды на входе: 95°F [35°C]
- температура воды на выходе: 85°F [29.4°C]
- температура наружного воздуха по влажному термометру: 78°F [25.6°C]

Совсем недавно была заменена загрузка градирни. Сама градирня, трубопроводы конденсаторной воды и насос находятся в хорошем состоянии. Больница планирует увеличить нагрузку на 50 процентов, чтобы суммарная производительность составляла 675 тонн [2370 кВт]. Должна ли в этом случае заменяться вся конденсаторная система? Если чиллер будет выбран правильно, ответ - "нет" (замены конденсаторной системы не требуется).

Как возможно такое? Если перепад давления воды в конденсаторе нового чиллера находится на таком же уровне или лежит ниже этого перепада для существующего чиллера, может прокачиваться такое же количество воды. При равном значении расхода может быть подобран чиллер с производительностью 675 тонн [2370 кВт] с ростом температуры воды в конденсаторе около 15°F [8.3°C]. Используя компьютерную программу расчета (от изготовителя градирни) можно подобрать для существующей градирни более высокую разность температур. Как показано на рисунке 31 новыми рабочими параметрами будут:

- температура воды на входе: 103°F [35°C]
- температура воды на выходе: 88°F [29.4°C]
- температура наружного воздуха по влажному термометру: 78°F [25.6°C]

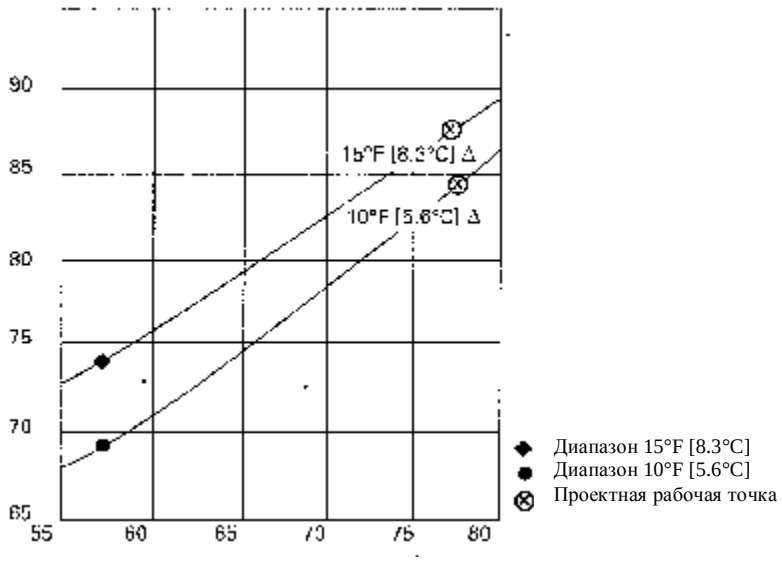
Это поясняет, как существующая градирня при том же расходе может обеспечить увеличение теплосъема (в рассмотренном примере увеличение составляет около 50%).

Инженер проектировщик часто может предложить решения, позволяющие существенно сократить полную стоимость проекта за счет использования существующей инфраструктуры и выбора чиллера с более высоким температурным дифференциалом.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Рисунок 31 Выбор градирни для различных производительностей чиллеров

Температура воды градирни [°F]



Температура по влажному термометру [°F]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Литературные источники раздела

1 "Condenser-Water Temperature Control for CenTraVac™ Centrifugal Chiller Systems'; *CTV-EB-84*, The Trane Company, May 1997,

2 Braun, J.E. and Diderrich, G.T. "Near Optimal Control of Cooling Towers for Chilled-Water Systems." *ASHRAE Transactions*, 96(2):806-13.1990.

3 Hydeman, M., Gillespie, K., and Kammerud, R. "CoolTools Project: A Toolkit to Improve Evaluation and Operation of Chilled Water Plants." Cool $ense National Forum on Integrated Chiller Retrofits, Lawrence Berkeley National Laboratory and Pacific Gas & Electric, September 1997.

4 Schwedler, M., PE, and Bradley, B.; "Tower Water Temperature-Control It How???" *Engineers Newsletter*, Volume 24, No. 1, The Trane Company, 1995.

5 "Water-Cooled Series R Chiller - Models RTHB & RTHC Condenser Water Control'; *RLC-EB-4*, The Trane Company, August 1999.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Выводы

Поскольку большинство систем охлажденной воды состоят более, чем из одного чиллера, чрезвычайно важно правильно понимать принципы работы и условия применения систем, состоящих из нескольких чиллеров.
В принципах работы таких систем нет ничего особенно сложного. Напротив, конструкция система должна выбираться с соблюдением определенных ключевых правил прикладной физики.

При разработке конструкции и эксплуатации систем охлажденной воды существует широкая возможность выбора. Это относится к величинам расходов, температур, конфигурации систем и опциям регулирования. После определения того, что хочет собственник здания и оператор чиллерной установки, правильный выбор указанных параметров и опций позволяет проектировщику обеспечить действительно оптимальное решение.

При использовании принципов, изложенных в данном издании, важно помнить следующие правила:

- ***Правило 1***: Простота. Однако простота не всегда означает использование наименьшего числа компонентов. Простота часто выражается в возможности универсального понимания.

- ***Правило 2***: Если проектировщик системы может объяснить, как работает эта система, это - хороший шанс того, что система будет отлично работать. Если проектировщик сам не может объяснить, как будет работать разработанная им конструкция, шанс того, что система будет работать эффективно, отсутствует.

- ***Правило 3***: Если оператор системы понимает объяснения проектировщика системы о том, как работает эта система, это - хороший шанс того, что система будет отлично работать. Если оператор системы не понимает, как будет работать разработанная проектировщиком конструкция, шанс того, что система будет работать эффективно, отсутствует.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Словарь, используемых терминов

ASHRAE - Американское общество инженеров систем нагрева, охлаждения и кондиционирования воздуха

building automation system (система автоматизации здания) - Комбинация контроллеров и программных продуктов, которые обеспечивают связь и регулирование различных механических систем при осуществлении управления. К ним относятся системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC), системы освещения и все прочие устройства здания. Другим названием этой системы является Система управления оборудованием здания (BMS)

chilled water (охлажденная вода) - другое название "охлажденная вода на выходе" или "вода на выходе испарителя". Холодная вода, производимая чиллером (проходящая через трубный пучок испарителя), и подаваемая с помощью насоса к теплообменникам кондиционеров в здании. Внутри испарителя находится хладагент, который принимает тепло от воды, возвращаемой от потребителей, и протекающей внутри труб.

chiller (охладитель жидкости) - система кондиционирования воздуха, обеспечивающая циркуляцию охлажденной воды к различным теплообменникам охлаждения установки.

coil (теплообменник) - испаритель или конденсатор, изготовленные из труб (может быть с оребрением или без него).

condenser (конденсатор) - Часть чиллера, в которой пары хладагента превращаются в жидкость, температура и давление которой может быть уменьшена при входе в испаритель.

condenser water, leaving (конденсаторная вода на выходе) - См. охлаждающая вода

cooling tower water (вода градирни) - См. охлаждающая вода

cooling water (охлаждающая вода) - Также используется обозначение "вода градирни", "вода на выходе конденсатора", "вода на входе абсорбера", "вода абсорбера-конденсатора" или "вода охлаждающей градирни". Вода от специального источника (градирни, реки, пруда, скважины), которая принимает тепло. Вода протекает по трубам абсорбера и конденсатора и возвращается к источнику.

В установках с электрическими приводами чиллеров вода отводит тепло только от конденсатора. В абсорбционных чиллерах охлаждающая вода используется также для охлаждения в абсорбере. Вода обычно подается от источника с температурой 85 F (29.4 C) сначала в абсорбер, а затем в конденсатор (последовательная компоновка). Связанные температуры воды: температура воды на входе в абсорбер (или температура на выходе градирни) и температура на выходе конденсатора (температура на входе градирни).

COP - Коэффициент производительности - безразмерная величина, характеризующая отношение количество произведенного холода к подведенному теплу. Характеризует эффективность работы.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

direct digital control (прямое цифровое регулирование) - Программирование, используемое в системах управления зданием для регулирования различных выходов (таких как вентили или приводы). Применительно к системам отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) термин DDC означает цифровое регулирование с помощью микропроцессорного контроллера без использования промежуточных устройств.

evaporator (испаритель) - Часть чиллера, в которой выполняется охлаждение воды системы за счет испарения хладагента при глубоком вакууме. Хладагент забирает тепло от воды, возвращаемой в систему.

fouling (загрязнение) - Отложения примесей на трубах на стороне циркуляции воды, в конденсаторах или чиллерах, которые приводят к ухудшению теплообмена.

heat exchanger (теплообменник)- Любое устройство для передачи тепла между двумя физически разделенными жидкостями.

heat transfer (теплопередача) - Процесс передачи тепла от одного тела или вещества к другому.

load (нагрузка) - Любое из выходных устройств, которые должны управляться со щита (панели) управления оборудованием здания.

mechanical-compression refrigeration cycle (цикл охлаждения с механическим сжатием) - В электрических чиллерах для привода компрессора и производства охлажденной воды для охлаждения используется электродвигатель. В механическом процессе сжатия в качестве рабочей жидкости используется хладагент. Внутри цикла возникают разности давлений и температур. Тепло принимается на стороне низкой температуры и отдается на строне более высокой температуры.

psychrometric chart (психрометрические таблицы) - Таблицы, показывающие соотношение между температурой, давлением и содержанием влаги в воздухе.

psychrometric measurement (психрометрическое измерение) - Измерение температуры, давления и влажности воздуха с помощью психрометрических таблиц.

pumps (system) (насосы - системы)

> *chilled water* (охлажденной воды) - обеспечивают циркуляцию охлажденной воды через испарительную секцию, а затем через теплообменники здания.
>
> *cooling water* (охлаждающей воды) - обеспечивают циркуляцию охлаждающей воды от источника через чиллер и конденсатор, а затем обратно к источнику.

shell-and-tube (кожухотрубный теплообменник) - Тип конструкции теплообменника, состоящего из труб, размещенных в кожухе или корпусе. Часто такая конструкция используется для конденсаторов и испарителей чиллера.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

shell-and-tube flooded evaporators (кожухотрубные испарители затопленного типа) - Испарители, в которых вода протекает через трубки, смонтированные внутри цилиндрического испарителя. Хладагент находится с наружной стороны трубок.

temperature, ambient (температура наружного воздуха) - Температура воздуха, окружающего рассматриваемый объект.

temperature, wet-bulb (температура воздуха по влажному термометру) - Измеренная степень влажности воздуха. Определяется температурой испарения пробы воздуха, измеренной с помощью влажного термометра.

tower water (вода градирни) - См. охлаждающая вода

three-way valve (трехходовой клапан) - Клапан регулирования расхода, имеющий три отверстия для протока жидкости. Клапан поддерживает постоянный расход через или вокруг нагрузки.

two-way valve (двухходовой клапан) - Клапан регулирования расхода, имеющий два отверстия для протока жидкости.

valve, throttling (дроссельный клапан) - небольшой клапан, используемый главным образом в линиях измерения давления для закрытия линии между снятием показаний и дросселирования линии для предотвращения флуктуаций во время снятия показаний.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Список, использованной литературы

2000 *ASHRAE HVAC Systems and Equipment Handbook,* Chapter 12, Hydronic Heating and Cooling System Design. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

2000 ASHRAE HVAC Systems and Equipment Handbook, Chapter 36, Cooling Towers. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

ARI Standard 550/590-1998, *Standard for Water Chilling Packages Using "the Vapor Compression Cycle,* Air-Conditioning & Refrigeration Institute.

ARI Standard 560-1992, *Standard for Absorption Water Chiller and Water Heating Package,* Air-Conditioning & Refrigeration Institute.

Avery, G., PE; "Controlling Chillers in Variable Flow *System" ASHRAE Journal,* February 1998. pp.42-45.

Braun, J.E. and Diderrich, G.T; "Near Optimal Control of Cooling Towers for Chilled-Water Systems" *ASHRAE Transactions,* 1990, 96(21:806-13.

BSR/ASHRAE/IESNA 90.1-1999, "Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings" *Illuminating Engineering Society of North America and American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,* Inc., 1999.

Coad, W.J., PE; "A Fundamental Perspective on Chilled Water Systems;' *Heating/Piping/Air Conditioning,* August 1998, pp. 59-66.
"Condenser Water Temperature Control For CenTraVac™ Centrifugal Chiller Systems'; *CTV-EB-84,* The Trane Company, May 1997.

Demirchian, G. H. PE and Maragareci, M. A. PE; "The Benefits of Higher Condenser Water ДТ at Logan International Airport Central Chilled Water Plant." *IDEA 88th Annual Conference Proceedings,* 1997, pp. 291-300.

Eley, C.: Energy Analysis—Replacement of Chillers For Buildings 43, 47, and 48. Eley Associates, CA, April 1997.

* Eppelheimer, D., PE and Bradley, B.; "Chilled Water Plants and...Asymmetry as a Basis of Design, *Engineers Newsletter,* Volume 28, No. 4, The Trane Company, 1999.

Hougton, D., PE; "Know Your Flow, a Market Survey of Liquid Flow Meters" Tech Update, *E SOURCE, INC,* March 1996

---

*)"Инженерные новости" (Engineers Newsletters), на которые имеются ссылки в данном издании, можно просмотреть на сайте: www.trane.com/commercial/library/newsletters.asp

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Hydeman, M., Gillespie, K., and Kammerud, R. "CoolTools Project: A Toolkit to Improve Evaluation, and Operation of Chilled Water Plants" *Cool $ense National Forum on Integrated Chiller Retrofits,* Lawrence Berkeley National
Laboratory and Pacific Gas & Electric, September 1997.
^

Kelly, D.W. and Chan, T; "Optimizing Chilled Water Plants'; *Heating/Piping/Air Conditioning.* January 1999, pp. 145-7.

Kirsner, W.; "The Demise of the Primary-Secondary Pumping Paradigm for Chilled Water Plant Design'; *Heating/Piping/Air Conditioning*. November 1996.

Landman, W. and Bradley, B.; "Off-Design Chiller Performance" *Engineers Newsletter.* Volume 25, No. 5, The Trane Company, December 1996.

Schwedler, M, PE, "Take It To the Limit...Or Just Halfway?" *ASHRAE Journal,* July 1998, pp.32-9.
* Schwedler, M., PE and Bradley, B.; "An Idea for Chilled-Water Plants Whose Time Has Come...Variable-Primary-Flow Systems'; *Engineers Newsletter,* Volume 28, No. 3, The Trane Company, 1999.

* Schwedler, M., PE and Bradley, B.; '"How Low Flow Systems Can Help You Give Your Customers What They Want" *Engineers Newsletter,* Volume 26, No. 2, The Trane Company, 1997.

* Schwedler, M., PE and Bradley, B.; "Tower Water Temperature - Control It How???" *Engineers Newsletter,* Volume 24, No. 1, The Trane Company, 1995.
Schwedler, M., PE and Nordeen, A.; "Low Flow Works for Absorbers Too!" *Contracting Business.* November 1998, pp. 108-112.

Schwedler, M., PE, Letter to the Editor, *ASHRAE Journal,* April 1998, p. 30.

Taylor, S. T; "Degrading Delta-T in New and Existing Chilled Water Plants';
Cool $ense National Forum on Integrated Chiller Retrofits, Lawrence Berkeley National Laboratory and Pacific Gas & Electric, September 1997.

Trane Applications Engineering Group; "A New Era of Free Cooling" *Engineers Newsletter,* Volume 20, No. 3, The Trane Company, 1991.
Trane Applications Engineering Group; "Two Good Old Ideas Combine to Form One New Great Idea" *Engineers Newsletter,* Volume 20, No. 1, The Trane Company, 1991.

Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding Its Economics," fee Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-1, The Trane Company, 1991.

Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding the Choices," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-2, The Trane Company, 1991.

Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage - Understanding System Design," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics.* ISS-CLC-3, The Trane Company, 1991.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Trane Applications Engineering Group, "Thermal Storage-Understanding Control Strategies," Ice Storage Systems, *Engineered Systems Clinics*. ISS-CLC-2, The Trane Company, 1991.

Waltz, J. P., PE, CEM; "Don't Ignore Variable Flow" *Contracting Business*, July 1997, pp.133-144.

"Water-Cooled Series R Chiller-Models RTHB & RTHC Condenser Water Control"; *RLC-EB-^*, The Trane Company, August 1999.

Webb, R.L. and Li, W.; "Fouling in Enhanced Tubes Using Cooling Tower Water, Part I: Long-Term Fouling Data" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com