



SPX

Производительность градирни. Базовая теория и практика

Компания АЭРФОРС совместно с компанией SPX Cooling Technologies (США), начинает публикацию серии статей о системах охлаждения водооборотных циклов на промышленных предприятиях, правилах выбора градирен, материалах и эксплуатации градирни при различных условиях.

Всего планируется выпустить 12 статей. Статьи адресованы техническим специалистам предприятий.

Общая теплопередача

Градирня с разомкнутой системой охлаждения, или просто градирня, представляет собой специальный теплообменник, в котором две среды (воздух и вода) вступают в непосредственное взаимодействие с целью осуществления теплопередачи.

В брызгальной градирне, показанной на рис. 1, теплопередача выполняется за счет разбрызгивания потока воды в виде дождевых капель, через которые проходит восходящий поток холодного воздуха, нагнетаемого вентилятором.

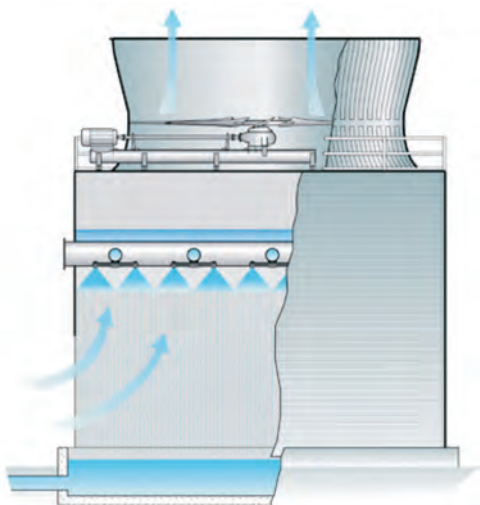


Рисунок 1.

Не принимая в расчет незначительную явную теплопередачу, которая может произойти через стены (обшивку) градирни, количество тепла, принимаемое воздухом, должно равняться количеству тепла, отданного водой.

Относительно потока воздуха коэффициент прироста тепла определяется выражением $G(h_2 - h_1)$, где:

G = массовый расход сухого воздуха, проходящего через градирню – фунт/мин

h_1 = энтальпия (общее теплосодержание) воздуха на входе – БТЕ/фунт (кг) сухого воздуха

h_2 = энтальпия воздуха на выходе – БТЕ/фунт (кг) сухого воздуха

Относительно потока воды коэффициент потери тепла должен выражаться как $L(t_1 - t_2)$, где:

L = массовый расход воды на входе в градирню – фунт (кг)/мин

t_1 = температура горячей воды на входе в градирню – °F (°C)

w = температура холодной воды на выходе из градирни – °F (°C)

Это вытекает из того факта, что БТЕ (британская тепловая единица) – это количество прироста или потери тепла, необходимого для изменения температуры 1 фунта (кг) воды на 1 °F (°C).

Однако по причине испарения, происходящего внутри градирни, массовый расход воды на выходе из градирни меньше, чем на входе, поэтому для правильного расчета температурного баланса необходимо учитывать это небольшое расхождение.

Поскольку коэффициент испарения должен равняться изменению коэффициента влажности (абсолютная влажность) воздушного потока, коэффициент потери тепла, определяемый изменением коэффициента влажности, может быть выражен как

$$G(H_2 - H_1)(t_2 - 32),$$

где:

H_1 = коэффициент влажности воздуха на входе – фунт (кг) пара/фунт (кг) сухого воздуха

H_2 = коэффициент влажности воздуха на выходе – фунт пара/фунт сухого воздуха

$(t_2 - 32)$ = выражение энтальпии воды при температуре холодной воды – БТЕ/фунт (кг) (энтальпия воды равняется нулю при 32 °F (°C))

Включая данную потерю тепла за счет испарения, общий баланс тепла между воздухом и водой, выраженный в виде дифференциального уравнения, составляет:

$$Gdh = Ldt + GdH(t_2 - 32) \quad (1)$$

Полное выведение уравнения (1) вы можете найти в статье «Комплексный подход к анализу производительности градирни», размещенной на сайте компании SPX Cooling Technologies.

Тепловая нагрузка, диапазон охлаждения и расход (галлонов в минуту (м3/час))

Выражение "Ldt" в уравнении (1) представляет тепловую нагрузку, сообщаемую градирне вне зависимости от технологического процесса, для которого она предназначена.



Однако поскольку измерение расхода воды (фунтов за единицу времени) вызывает определенную сложность, тепловая нагрузка обычно выражается в виде:

$$\text{Тепловая нагрузка} = \text{grm} (\text{м}^3/\text{час}) \times R \times 81/3 = \text{БТЕ}/\text{мин} \quad (2)$$

Где:

grm = расход воды, участвующей в технологическом процессе и прошедшей через градирию – гал/мин ($\text{м}^3/\text{час}$)

R = «диапазон» = разница между температурой горячей и холодной воды - °F (°C) (см. рис. 3)

81/3 = фунтов на галлон воды (3,235 кг/литр воды)

Заметьте, что, согласно формуле (2), тепловая нагрузка устанавливает только требуемую разность температур технологической воды и не затрагивает текущие показатели температуры горячей и холодной воды.

Таким образом, указание только тепловой нагрузки не имеет никакого значения для специалиста по технико-экономическому анализу, который занимается выбором необходимых габаритов градирии.

Для этого требуется больше информации по конкретным параметрам.

Рисунок 2.

Понятие оптимального технологического процесса укладывается в сравнительно узкий диапазон коэффициентов расхода и показателей температуры холодной воды, что определяет два параметра, необходимых для выбора габаритов градирии,

– расход воды, участвующей в технологическом процессе и прошедшей через градирию (grm)($\text{м}^3/\text{час}$), и температура холодной воды.

Тепловая нагрузка, увеличиваемая в ходе технологического процесса, устанавливает третий параметр – температуру горячей воды на входе в градирию.

Например, предположим, что технологический процесс, в ходе которого тепловая нагрузка увеличивается до 125000 БТЕ/мин, имеет лучшую производительность при подаче 1000 grm (227 $\text{м}^3/\text{час}$) воды при 85 °F (29°C). Немного преобразовав формулу (2), мы можем определить увеличение температуры воды в ходе технологического процесса следующим образом:

$$R = \frac{125,000}{1,000 \times 81/3} = 15^\circ\text{F}$$

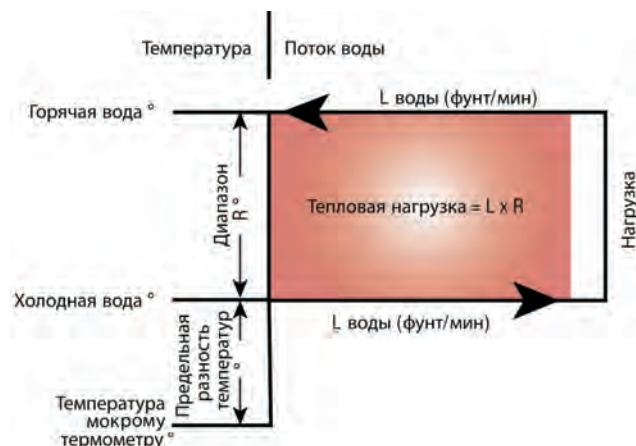


Рисунок 3.



Следовательно, температура горячей воды на входе в градирню должна составлять $85\text{ }^{\circ}\text{F} (29^{\circ}\text{C}) + 15\text{ }^{\circ}\text{F} (9^{\circ}\text{C}) = 100\text{ }^{\circ}\text{F} (38^{\circ}\text{C})$.

Температура по влажному термометру

Приняв за условие то, что градирня должна быть в состоянии охлаждать 1000 gpm (227 м³/час) воды со 100 °F(38°C) до 85 °F(29°C), какие параметры воздуха на входе нам необходимо знать?

Согласно уравнению (1), наибольшую важность представляет энтальпия, но энтальпия воздуха – это не тот параметр, который подвергается ежедневным измерениям и регистрации в любой точке земного шара.

Однако измерение температур по влажному и сухому термометру не вызывает трудностей.

Посмотрев на рис. 2 (психрометрическая диаграмма), вы можете увидеть, что кривые постоянной влажного термометра параллельны кривым постоянной энтальпии, в то время как кривые постоянной сухого термометра не имеют четкой взаимосвязи с энтальпией.

Таким образом, температура по влажному термометру является параметром воздуха, который необходимо знать для правильного выбора габаритов градирни и расчета соотносящихся с ними параметров, как показано на рис. 3.

Влияние переменных

И хотя несколько параметров определены на рис. 3, каждый из которых влияет на выбор габаритов градирни, понимание их влияния упрощается, если уместить его в категории

- 1) тепловой нагрузки,
- 2) диапазона охлаждения,
- 3) предельной разности температур и
- 4) температуры по влажному термометру.

Если оставить постоянными три из вышеприведенных параметров, но изменить четвертый, то это повлияет на определение габаритов градирни следующим образом.

1. Габариты градирни находятся в прямой и линейной зависимости от тепловой нагрузки (рис. 4).

2. Габариты градирни находятся в обратной пропорциональной зависимости от диапазона охлаждения.

См. рис. 5. Это объясняется двумя основными факторами.

Во-первых, по причине расширения диапазона охлаждения (рис. 3) также увеличивается начальная разность температур (движущая сила) между температурой горячей воды на входе и температурой по влажному термометру на входе. Во-вторых, расширение диапазона охлаждения (при постоянной тепловой нагрузке) требует уменьшения расхода воды (формула (2)), что понижает статическое давление, оказывая сопротивление потоку воздуха.

3. Габариты градирни находятся в обратной пропорциональной зависимости от предельной разности температур. Большая предельная разность температур предполагает градирню меньшего размера. См. рис. 6. И напротив, меньшая предельная разность температур предполагает градирню значительно большего размера, и при значении 5 °F (3°C) ее влияние на габариты градирни приобретают асимптотический характер. По этой причине в промышленном секторе градирен принята предельная разность температур составляет не менее 5 °F (3°C).

4. Габариты градирни находятся в обратной пропорциональной зависимости от температуры по влажному термометру. При постоянных значениях тепловой нагрузки, диапазона охлаждения и предельной разности температур уменьшение расчетной температуры по влажному термометру приведет к увеличению габаритов градирни – см. рис. 7. Это происходит ввиду того, что большая часть теплопередачи в градирне осуществляется за счет испарения (которое извлекает около 1000 БТЕ из каждого фунта (кг) испаряемой воды), и того, что способность воздуха к абсорбции влаги уменьшается в зависимости от температуры.

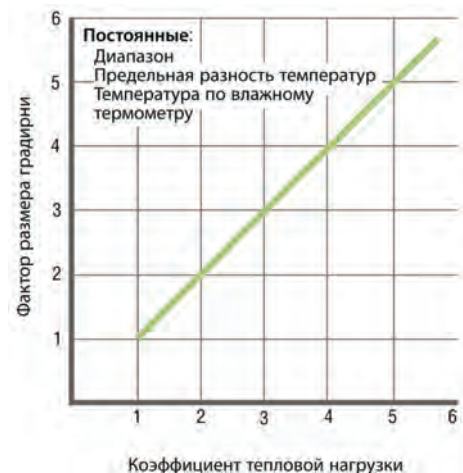


Рисунок 4.

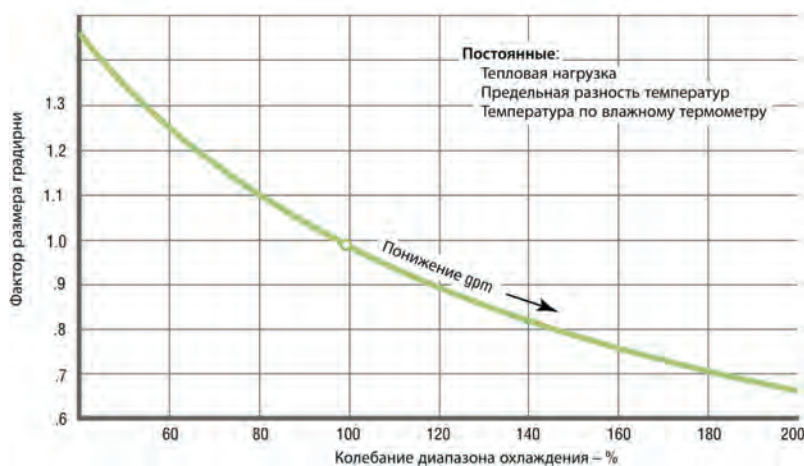


Рисунок 5.

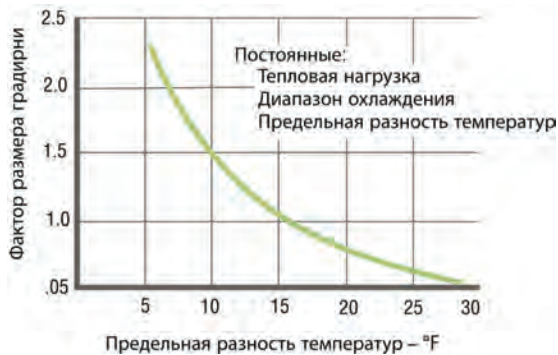


Рисунок 6.

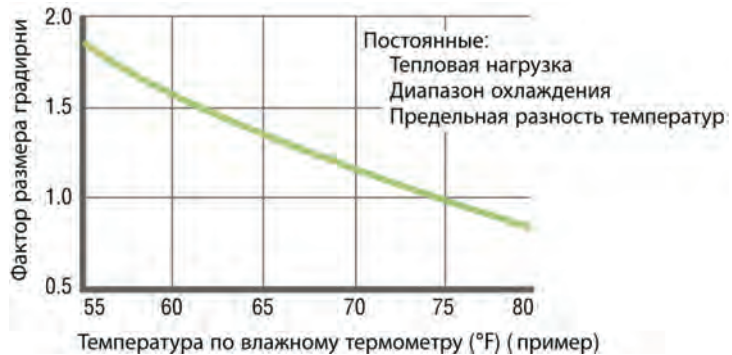


Рисунок 7.

Визуализация теплопередачи

Для того чтобы определить общую теплопередачу в градирне, возьмем для примера градирню, предназначенную для охлаждения 120 грт (27 м³/час) воды с 85 °F (29°C) до 70 °F (21°C) при расчетной температуре по влажному термометру 65 °F (18°C) и (только в целях наглядности) соответствующей температуре по сухому термометру 78 °F (21,5°C) (таковы условия, определенные в соответствии с п. 1 рис. 2).

Будем считать, что расход воздуха, проходящего через градирню, составляет 120 грт (приблизительно 27 м³/час).

Поскольку массовый расход воды и воздуха одинаков, можно сказать, что один фунт (кг) воздуха контактирует с одним фунтом (кг) воды. Психрометрический путь прохождения по градирне одного такого фунта (кг) воздуха был изображен на рис. 2.

Воздух поступает в градирню при условии 1 (температура по влажному термометру 65 °F (18°C) и температура по сухому термометру 78 °F (21,5°C)) и начинает накапливать тепло и влагу для того, чтобы достичь равновесия с водой.

Этот путь по достижению равновесия (сплошная линия) продолжается до тех пор, пока воздух не покидает градирню при условии 2. Пунктирные линии свидетельствуют о следующих изменениях психрометрических свойств данного фунта воздуха, произошедших вследствие его контакта с водой:

- общее теплосодержание (энтальпия) увеличилось с 30,1 БТЕ до 45,1 БТЕ. Данное увеличение энтальпии на 15 БТЕ было вызвано контактом с водой.

Таким образом, температура одного фунта (кг) воды понизилась на требуемые 15 °F (9°C), см. стр. 1;

- содержание влаги в воздухе увеличилось с 72 до 163 частиц (7000 частиц = 1 фунт).

Данная 91 частица влаги (0,013 фунта воды (0,0058 кг воды)) была испарена из воды при теплоте фазового перехода в испарение, составляющей около 1000 БТЕ/фунт.

Это означает, что извлечение из воды около 13 из 15 БТЕ (примерно 86 % от общего количества) произошло за счет испарения.

При определенном расходе воздуха, проходящем через градирню, уровень возможной теплопередачи зависит от количества воды, подвергаемой воздействию этого воздуха.

В градирне, изображенной на рис. 1, общая поверхность воды, охлаждаемой воздухом, представляет собой совокупность множества поверхностей капель различного размера, во многом зависящего от давления распыления воды.

При более высоком давлении распыляются капли меньшего размера, за счет чего увеличивается общая поверхность охлаждаемой воды.

Однако капли имеют свойство соединения в процессе распыления, что, конечно, приводит к образованию капель большего размера и, как следствие, к уменьшению общей поверхности охлаждаемой воды.

Поэтому объективное прогнозирование тепловой производительности брызгальной градирни вызывает в лучшем случае большие трудности и во многом зависит от качественного исполнения форсунок, а также поддержания постоянного давления воды.

Справка:

Теплота фазового перехода в испарение варьируется в зависимости от температуры – от приблизительно 1075 БТЕ/фунт при 32 °F до 970 БТЕ/фунт при 212 °F.

Фактические значения при определенной температуре приведены в различных пособиях по термодинамике.

Вы можете ознакомиться с обширной библиотекой технических документов, представленной на сайте spxcooling.com, в которой описаны процедуры настройки систем распределения воды, другие типы градирен, а также различные типы оросителей, используемые для увеличения поверхности охлаждаемой воды и повышения тепловой производительности.



Компания ООО АЭРОФРС – поставщик проектных решений оборудования и сервиса. Эксклюзивный репрезентативный офис компании SPX Cooling Technologies на территории Украины и Республики Молдова. Сайт: airforce.ua



Компания SPX Cooling Technologies - мировой лидер в производстве градирен, испарительных конденсаторов и систем охлаждения. Сайт: spxcooling.com