

# Влияние Внешних Факторов

## НА РАБОТУ ГРАДИРЕН

### Предисловие

Очевидно, что и заказчикам градирен, и проектировщикам хочется, чтобы градирни работали в строгом соответствии со спецификациями. В противном случае производство, на котором установлена градирня, будет так или иначе страдать. Поэтому и те, и другие тщательно рассчитывают значения тепловых нагрузок, уровень расхода воды, необходимые температуры холодной воды и проектные температуры по влажному термометру в надежде, что эти значения не будут превышать в повседневной эксплуатации.

Производители градирен не менее заинтересованы в их бесперебойной работе, ведь от этого зависит их собственная репутация и престиж всей отрасли промышленности. Имея уже разработанные проектные параметры, по которым в дальнейшем предстоит работать, важно как можно более точно подобрать соответствующие им тип и размер градирни, рассчитать необходимый уровень расхода воздуха и мощность вентилятора, достаточную для обеспечения этого уровня.

Как же в таком случае получается, что работа значительного количества градирен оказывается неудовлетворительной, несмотря на заинтересованность в обратном и производителей, и заказчиков? Во многих случаях проблема кроется в различных факторах окружающей среды, которые могут влиять на количество и температурные параметры воздуха, поступающего в градирни. В предлагаемой статье будут описаны ситуации, связанные перебоями воздухообеспечения градирен, и предложены меры предварительного планирования, необходимые для исправления этих ситуаций.

В определенном смысле градирня реагирует на характеристики поступающего в нее воздуха подобно человеческому организму. Например, она начинает «задыхаться», если ей приходится «вдыхать» только что отработанный ею воздух. Недостаточный приток воздуха также может довести градирню до асфиксии. Однако в двух весьма важных вещах градирни отличаются от людей: оказавшись в опасной ситуации, они не могут убежать, и еще они обладают склонностью к саморазрушению.

### Рециркуляция

В ходе эволюции дыхательная система человеческого организма приобрела такое строение, что между выдохом и следующим вдохом проходит пара секунд, за который «отработанный» воздух успевает рассеяться. Дыхание же градирни, наоборот, непрерывно, и теплый насыщенный влагой воздух она выбрасывает в ту же самую атмосферу, из которой пытается получить холодный и сухой. Иногда некоторая часть отработанного воздуха рециркулирует в поток входящего, и тогда градирня начинает испытывать проблемы, связанные с повышением температуры воды в системе.

В итоге рециркуляция вызывает повышение температуры по влажному термометру входящего воздуха и как следствие – повышение температуры воды, покидающей градирню. В зависимости от интенсивности рециркуляции температура холодной воды может подняться на 0,5–3 °С или больше. В лучшем случае это приведет к работе с превышением расчетных параметров, в худшем – будет превышен предел прочности системы, и тогда потребуются ее аварийный останов. Пользователям градирен надлежит принимать во внимание это явление и знать, какие меры необходимо применять для снижения его вредного воздействия.

Теоретически рециркуляция возникает на всех градирнях, однако ее интенсивность зависит в первую очередь от скоростей движения воздуха на входе и выходе, а также того, каким образом они взаимосвязаны. Высокая скорость потока воздуха в воздухозаборниках повышает потенциал для рециркуляции, высокая скорость в выпускном воздуховоде понижает его. Причина в том, что при высокой скорости потока в воздухозаборнике возле него создается зона пониженного давления, куда может всасываться и выбрасываемый градирней пар. Быстрые же потоки воздуха на выходе из системы, как правило, выносят пар за пределы зоны низкого давления.

На **рис. 1 и 2** изображены градирни с минимальной и максимальной рециркуляцией. В градирне с искусственной тягой (**рис. 1**) вентилятор направляет поток исходящего воздуха вертикально вверх со скоростью примерно 10 м/с, тогда как свежий воздух всасывается в воздухозаборники со скоростью менее 3,5 м/с. Такое соотношение скоростей позволяет утверждать, что на данной градирне самонаведенная рециркуляция возникать практически не будет (ниже будет рассказано о том, как внешние факторы могут сводить на нет работу даже самых лучших конструкций).

Соотношение скоростей входящего и выходящего потоков воздуха на градирне с принудительной тягой (**рис. 2**) практически противоположно только что рассмотренному: здесь скорость потока воздуха в районе вентилятора на воздухозаборнике в среднем выше 10 м/с, а скорость исходящего потока (в верхней части градирни), как правило, меньше 3,5 м/с. Таким образом, на входе в воздушную систему градирни создается область низкого давления, куда может всасываться и некоторое количество отработанного воздуха.



РИС. 1 Поперечноточная градирня с искусственной тягой



РИС. 2 Противоточная градирня с принудительной тягой

## Ограниченный приток воздуха

При заданной тепловой нагрузке, постоянном уровне расхода воды и постоянной температуре в системе по влажному термометру температура холодной воды в градирне полностью зависит от количества поступающего в нее воздуха: Со снижением уровня расхода воздуха температура холодной воды повышается. Производители градирен, понимая важность такого параметра, как расход воздуха, стараются досконально просчитать его уровень, необходимый для достижения расчетных показателей работы систем, а также мощность двигателей вентиляторов, которым предстоит снабжать градирни воздухом в нужных количествах, преодолевая создающееся внутри них статическое давление.

Статическое давление – это мера сопротивления, которое встречает попадающий в систему поток воздуха. Возникает оно в результате и изменений направления потока воздуха, а также под действием сужений воздуховодов, которые увеличивают скорость потока. Внутри градирен потоки воздуха множество раз меняют направление и проходят через узкие участки: оросители, каплеуловители, элементы конструкции трубопроводов и т.д. Все это вместе создает общее статическое давление системы, в соответствии с уровнем которого производители подбирают мощность двигателей вентиляторов. Если статическое давление по каким-либо причинам возрастает, уровень расхода воздуха падает, что, в свою очередь, приводит к повышению температуры холодной воды в градирне.

## Влияние внешних факторов

Для определения явлениям рециркуляции и статического давления, которые вызывают у градирен удушье, мы переходим к рассмотрению основных внешних факторов, способствующих возникновению этих явлений. Речь пойдет о ветре и препятствиях на пути воздушных потоков.

## Ветер

При определенной скорости и направлении ветер может усиливать рециркуляцию воздуха на градирни. Он не просто сдувает поток исходящего воздуха в некотором направлении, но и создает с подветренной стороны градирни область низкого давления, куда может стягиваться часть насыщенного влагой шлейфа. Если воздухозаборники градирни оказываются на подветренной стороне, можно ожидать, что исходящий поток воздуха будет смешиваться со входящим, повышая его температуру.

Степень влияния ветра на высоту шлейфа зависит от отношения скорости исходящего потока воздуха ( $V_J$ ) к скорости ветра ( $V_A$ ). На рис. 3 показано, как ведет себя паровой шлейф, покидая цилиндр вентилятора градирни с искусственной тягой со скоростью 9 м/с и встречая ветер той же силы. Масштаб рисунка не позволяет показать, что некоторая часть шлейфа при этом опускается в область низкого давления на подветренной стороне градирни.

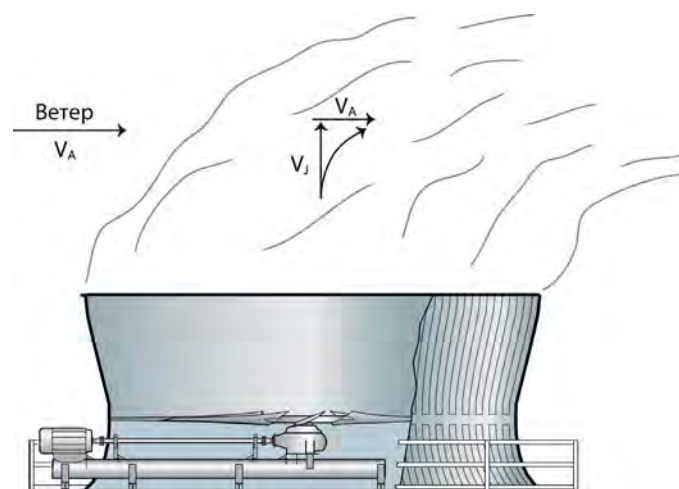
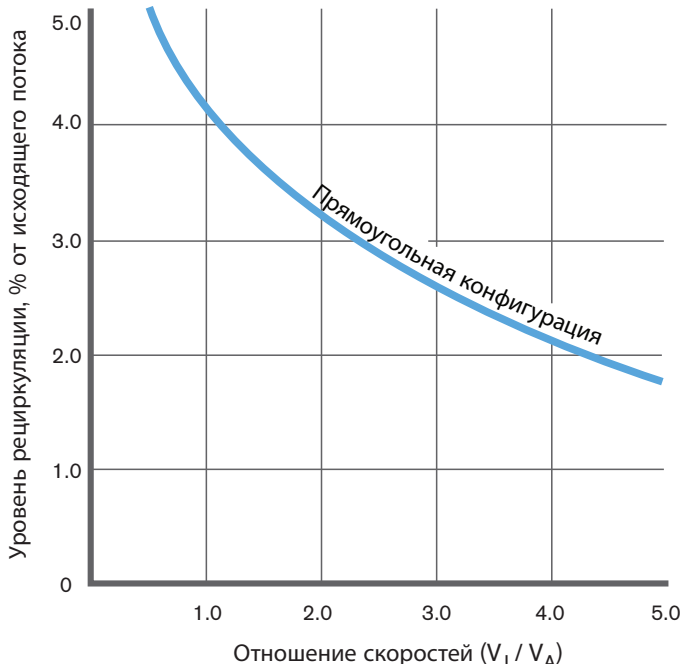


РИС. 3 Влияние ветра на паровой шлейф

Впрочем, поскольку на градирнях с искусственной тягой (рис. 1) воздухозаборники устанавливаются по двум противоположным сторонам, рециркуляция обычно возникает только на одной из сторон, и ее итоговое воздействие на работу системы остается минимальным. Тем не менее в связи с этим воздействием были проведены исследования, результатом которых стало построение кривой потенциальной рециркуляции (рис. 4). Эта кривая представляет процент общей рециркуляции как функцию от отношения скорости исходящего потока воздуха ( $V_J$ ) к скорости ветра ( $V_A$ ). Графики такого типа справедливы для градирен прямоугольной конфигурации с воздухозаборниками, расположенными по двум противоположным сторонам корпуса (рис. 1).

На градирнях с воздухозаборниками на одной стороне (рис. 2) указанный уровень рециркуляции, соответственно, удваивается. Обратите внимание, что данная кривая не описывает реальный уровень рециркуляции – с ее помощью можно лишь теоретически рассчитать уровень рециркуляции при неблагоприятном направлении ветра.



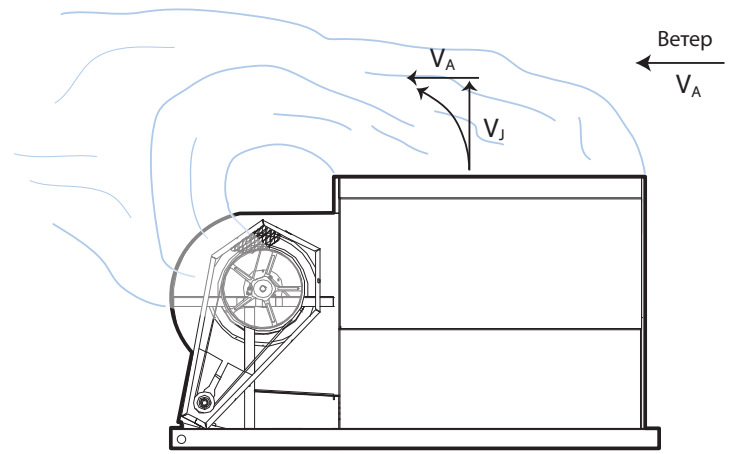
**РИС. 4** Потенциальная рециркуляция на градирнях прямоугольной конфигурации

Для определения предполагаемой температуры входящего воздуха по влажному и сухому термометру в любых эксплуатационных условиях уровень рециркуляции используется в следующей формуле:

$$h_e = \left( \frac{\% \text{ Рециркуляция}}{(100 - \% \text{ Рециркуляция})} \times \frac{L}{G} \times R \right) + h_a$$

- где  $h_a$  = энтальпия атмосферного воздуха, БТЕ/фунт  
 $h_e$  = общая энтальпия входящего воздуха, БТЕ/фунт  
 $L$  = расход воды, фунт/мин (= галлон/мин × 8,33)  
 $G$  = расход воздуха, фунт/мин (= фут<sup>3</sup>/удельный объем)  
 $R$  = разница между температурой горячей и холодной воды, °C

Температуры входящего воздуха по влажному и сухому термометру для градирен с искусственной и принудительной тягой при одинаковых условиях даются в Приложении.



**РИС. 5** Рециркуляция конфигурации

На рис. 5 изображен процесс рециркуляции на градирне с воздухозаборником на одной стороне при низкой скорости исходящего потока и той же скорости ветра, что и на рис. 3. При отношении скорости исходящего воздуха к скорости ветра, равном 0,5, уровень рециркуляции будет составлять примерно 10 % (вдвое больше, чем на рис. 4). С другой стороны, на градирне с искусственной тягой при соотношении скоростей исходящего воздуха и ветра, равном 1,0, уровень рециркуляции будет составлять примерно 4 %. Эти показатели типичны для градирен, установленных на открытой местности без учета розы ветров.

## Интерференция

В тепловые характеристики работы градирни могут «вмешиваться» локальные источники тепла, расположенные относительно нее с наветренной стороны. Это явление называют интерференцией. Вызывать интерференцию могут различные системы и процессы. Зачастую ее причиной является исходящее тепло от других градирен, расположенных поблизости.

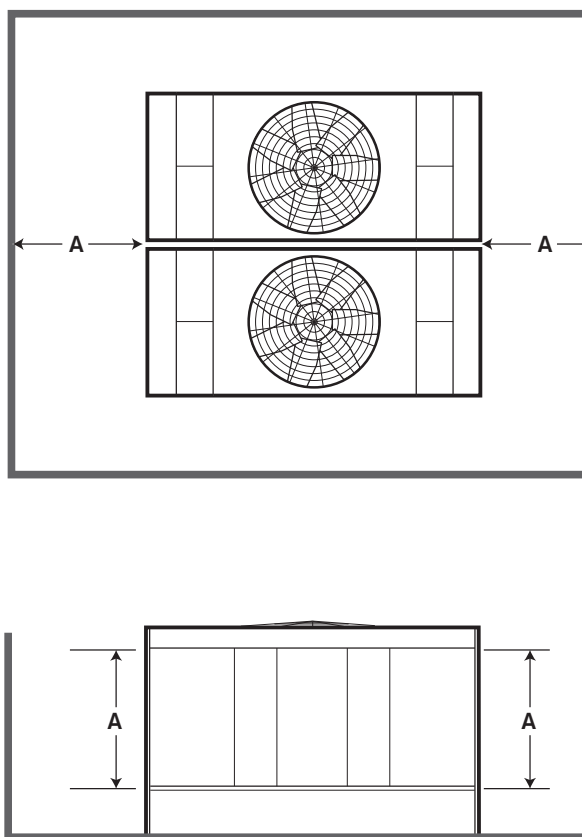
Как и рециркуляция, интерференция повышает температуру входящего воздуха по влажному термометру, однако ее влияние, как правило, оказывается более существенным, поскольку она вызывает повышение температуры входящего воздуха одновременно на всех воздухозаборниках градирни и в отсутствие рециркуляции. На многих градирнях температуры по влажному термометру могут превышать расчетные именно вследствие интерференции, несмотря самые изощренные конструктивные нововведения, призванные снизить уровень рециркуляции. Вместе с тем в результате предварительного планирования действие интерференции может быть практически сведено к нулю, как будет показано в данной статье в разделе «Рекомендации».

## Стены и ограждения

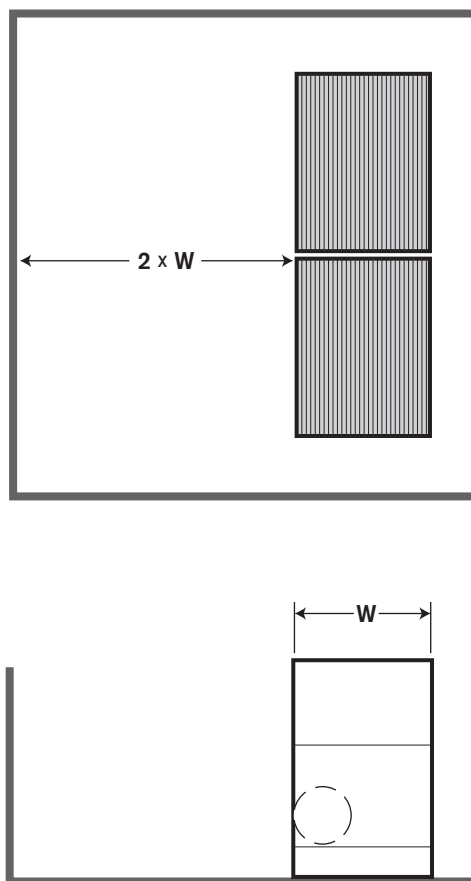
В широком смысле преграды на пути входящих потоков воздуха можно считать частным случаем интерференции, поскольку они также «вмешиваются» в свободное поступление воздуха в градирню. Различные препятствия могут служить причиной усиления рециркуляции воздуха, смещая направление потоков или увеличивая их скорость. Какое из этих двух воздействий следует принимать во внимание в первую очередь, зависит от типа градирни, как будет показано ниже.

Хотя препятствовать свободному поступлению воздуха могут стены, постройки и даже элементы ландшафта, расположенные в непосредственной близости от воздухопроводов градирни, чаще всего такими препятствиями становятся ограждения, скрывающие градирни от взглядов почтенной публики. Им и будет посвящена оставшаяся часть статьи. Следует понимать, что изложенные ниже эмпирические правила расчета расстояния от градирни до ограждения в равной мере относятся к монтажным нишам и любым объектам, расположенным в непосредственной близости.

Более всего на тепловые характеристики работы градирен влияют сплошные ограждения, закрывающие их со всех сторон, поскольку в этом случае приток свежего воздуха будет осуществляться только сверху вниз. На рис. 6 и 7 изображены ограждения, которые могут устанавливаться на градирнях с искусственной и принудительной тягой соответственно. Показанные здесь расстояния между ограждениями и воздухозаборниками рекомендованы только для 1- или 2-секционных градирен (для простоты изложения в данной статье рассматриваются градирни с одним вентилятором на каждую секцию). Для градирен с большим количеством секций это расстояние должно увеличиваться на 15 % с каждой дополнительной секцией. Альтернативные варианты ограждений будут рассматриваться параллельно со сплошными.



**РИС. 6** Градирня с искусственной тягой и сплошным 4-сторонним ограждением



**РИС. 7** Градирня с принудительной тягой (с зубчатым вентилятором) и сплошным 4-сторонним ограждением

Для градирни с искусственной тягой (рис. 6) наименьшее расстояние от ограждения до воздухозаборника равно его высоте, т. е. длине вертикальной стороны жалюзи. Для градирни с принудительной тягой это же расстояние равно ее удвоенной ширине. Для такого подбора расстояний есть определенные причины.

Хотя на градирнях с искусственной тягой уровень рециркуляции ниже, чем на градирнях с принудительной тягой, в них ниже и общий уровень статического давления, и поэтому они более чувствительны к ослаблению притока воздуха. Это означает, что ограждения градирен с искусственной тягой должны проектироваться с учетом того, насколько они ослабляют приток воздуха в систему. При обозначенных на рис. 6 расстояниях от заграждения до градирни максимальная скорость притока воздуха сверху не превышает минимальной скорости входящего потока воздуха. Отсюда следует, что потери входящего воздуха будут пренебрежимо малы, поскольку давление потока воздуха прямо пропорционально его скорости. Более того, хотя ограждение оставляет доступ лишь для нисходящего притока воздуха, что равносильно перемещению воздухозаборников градирни в непосредственную близость к выпускному воздухопроводу, отношение скорости исходящего потока к скорости входящего сохраняется на уровне 3:1 и рециркуляция в теории усиливается лишь незначительно.

Градирни с принудительной тягой, напротив, характеризуются сравнительно высоким внутренним статическим давлением, поэтому на их работе практически не отражаются небольшие потери в притоке воздуха. Если бы потери воздуха на воздухозаборниках имели существенную значимость, расстояние, указанное на рис. 7, равнялось бы одной ширине градирни. Однако по причине предрасположенности градирен с принудительной тягой к повышенной рециркуляции их ограждения должны проектироваться с учетом того, насколько они способствуют ее усилению. При расстоянии, обозначенном на рис. 7, скорость

направленного вертикально вверх исходящего потока по крайней мере вдвое превышает скорость направленного вертикально вниз входящего потока. Хотя для устранения возможности самонаведенной рециркуляции предпочтительна еще большая разница этих скоростей, дальнейшее увеличение площади внутри ограждения, как правило, оказывается неоправданным и не влияет на отношение скорости исходящего потока к скорости ветра. Поэтому для повышения скорости исходящего потока воздуха на выпускные воздуховоды градирен с принудительной тягой устанавливаются сужающиеся раструбы (на **рис. 7** не показано). Такие раструбы поставляются производителями, и, как правило, вместе с ними требуется устанавливать вентиляторы повышенной мощности, поскольку статическое давление в системах после их установки также возрастает. При установке раструба неизбежно потребуется более высокое ограждение, поскольку его задача – скрывать от глаз конструкцию целиком.

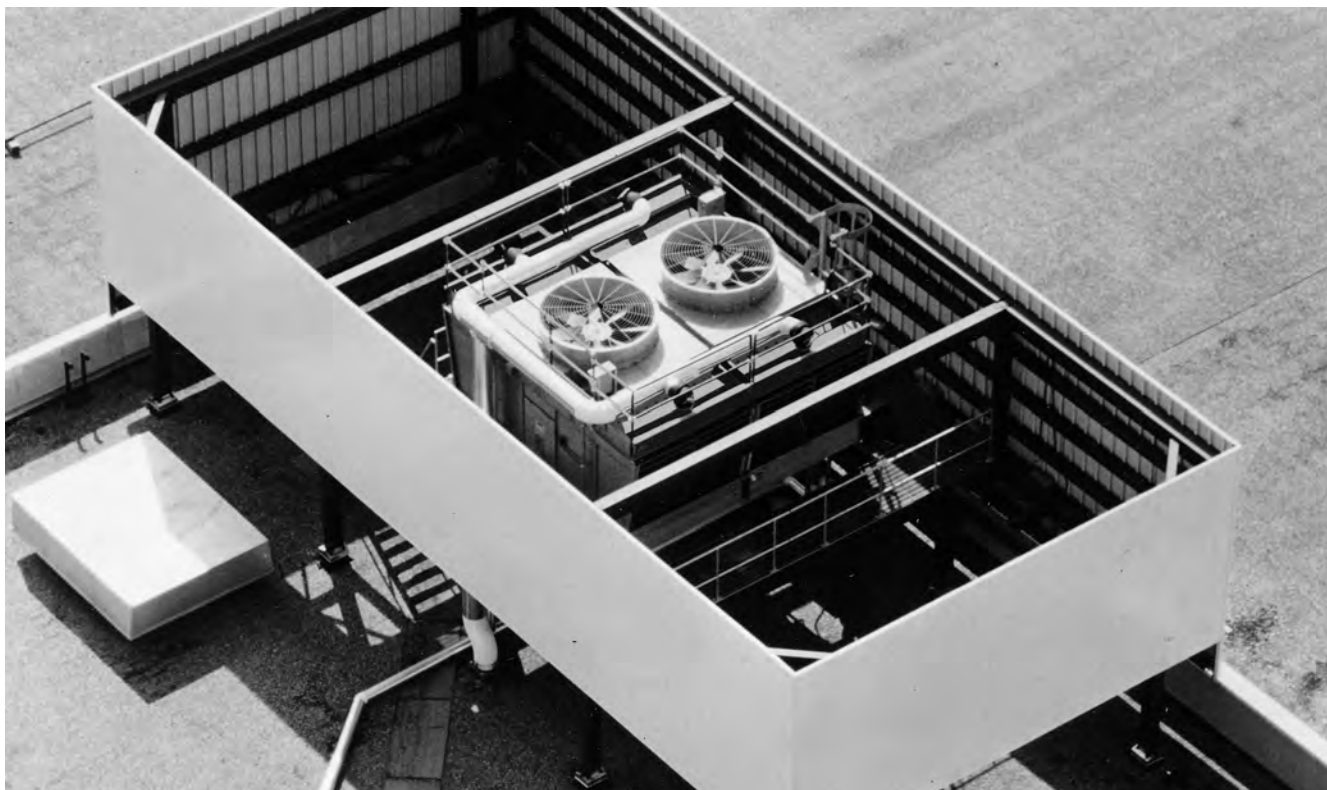
Однако при этом высота ограждений ни в коем случае не должна превышать высоты градирни. Иначе говоря, стенки ограждения должны быть одной высоты с выпускным воздуховодом градирни или немного ниже, поскольку в противном случае резко усилится рециркуляция внутри ограждения.

Кроме того, в стенках ограждений могут быть предусмотрены проемы (с жалюзиными заслонками либо полностью открытые), обеспечивающие некоторый горизонтальный приток воздуха к градирне. Зачастую эти проемы компенсируют слишком малое расстояние от стенок ограждения до воздуховодов, однако не следует думать, что любого проема в ограждении будет достаточно. Стенки любого отверстия создают завихрения в проходящем сквозь него потоке воздуха, в результате чего

уменьшается его эффективная площадь, хотя внешне кажется, что притоку воздуха ничто не мешает. Разумеется, в зависимости от конфигурации и конструкции проема эффективная площадь сечения потока воздуха будет меняться. В полностью открытых проемах за счет описанного эффекта теряется 5–10 % эффективной площади сечения воздушного потока, тогда как для проемов с жалюзиными заслонками и ограждений из перфорированных панелей этот показатель поднимается до 50 %. Компенсировать эти потери можно, расширив периметр ограждения либо увеличив площадь открытых проемов.

На **рис. 8** и **9** показаны ограждения, проемы в которых, оставленные, где это возможно, служат для «вентиляции» внутреннего пространства. Короткие стороны ограждения на **рис. 8** отстоят от воздухозаборников градирни на достаточное расстояние. Кажется, будто «подвешенная» стенка слишком заслоняет ближний (на фотографии) воздухозаборник, однако большую часть необходимого притока воздуха обеспечивает приподнятость градирни внутри ограждения, а остальное компенсируют вентиляционные проемы.

Ограждение на **рис. 9** в целом более непроницаемо для воздуха, вентиляционные проемы расположены здесь только на одной стене. При правильно подобранных размерах они лишь незначительно повышают статическое давление в системе. Однако при неблагоприятном ветре они же могут способствовать интенсивной рециркуляции. Если, к примеру, в теплое время года господствующие ветра будут дуть так, что сторона ограждения с вентиляционными проемами окажется подветренной, некоторое количество исходящего воздуха будет втягиваться в образующуюся там зону пониженного давления и оттуда попадать через проемы в воздухозаборники.



**РИС. 8**



РИС. 9

## Рекомендации

1. Рекомендованные расчетные температуры по влажному термометру для различных географических зон содержатся в виде таблиц в различных публикациях, среди которых источником может служить интернет-издание Engineering Weather Data («Технические метеорологические данные»), публикуемое правительством США. Вместе с тем во многих случаях данные для этих таблиц поступают с военных объектов и аэропортов класса «А», поэтому в них отсутствует поправка на эффект «теплого острова», характерного для крупных городов. И, естественно, в них не будет поправок на влияние точечных источников тепла, расположенных в непосредственной близости от предполагаемого места строительства градирни.

Поэтому полезной практикой станет (при наличии возможности) самостоятельное проведение там замеров температуры по влажному термометру и сравнение результатов с данными ближайшей метеостанции. Разница между этими показаниями будет служить основанием для введения поправок в расчетные температуры по влажному термометру, взятые из наиболее авторитетного источника. Там же, где самостоятельное проведение замеров температуры оказывается проблематичным или невозможным, для городской среды рекомендуется повышать расчетную температуру по влажному термометру как минимум на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  от публикуемых данных.

2. При отсутствии ограничений на размещение градирни ее следует располагать так, чтобы воздухозаборники не оказывались на подветренной стороне (относительно ветра, господствующего в теплое время года при максимальной температуре по влажному термометру). В этом случае рециркуляция, вызванная сезонными изменениями направления ветра, скорее всего, будет возникать при пониженных температурах по влажному термометру и превышение температурой холодной воды расчетных значений не будет критическим.

3. Если же возникновение интенсивной рециркуляции неизбежно (например, внутри ограждения), расчетную температуру по влажному термометру, указанную в пункте 1, следует повысить еще на  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  для градирен с искусственной тягой и на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  – для градирен с принудительной тягой (см. Приложение).

4. Если проектируемое ограждение оказывается слишком тесным или градирня устанавливается в районе с плотной застройкой (что может привести к интенсивной рециркуляции или потере статического давления), необходимо получить консультацию производителя относительно возможности изменения габаритов градирни или повышения рабочей мощности двигателя вентилятора.

## Приложение

**Условия:** градирни, охлаждающие 1050 галлонов (3974 л) воды в минуту с 35 до 30 °C при внешней температуре по влажному термометру 25,5 °C: модели Marley NC8403RAN1 с искусственной тягой и Marley MCW90174QRR1 с принудительной тягой. Градирни, работающие при скорости ветра 16 км/ч ( $VA = 4,5$  м/с) с расположением воздухозаборников на подветренной стороне либо обнесенные ограждениями.

**Задача:** определить предполагаемую температуру по влажному термометру на воздухозаборнике каждой градирни.

**Решение:**

| Единицы (источник)   | Искусственная | Принудительная |
|--|---------------|----------------|
|  | тяга          | тяга           |
| фут <sup>3</sup> /мин на вентиляторе (данные каталога) .....   | 101 000       | 77 040         |
| фут <sup>3</sup> /мин на выпускном воздуховоде (удельный объем ~2 % от объема градирни) .....          | 101 000       | 78 581         |
| G (удельный объем на выходе 14,5 фут <sup>3</sup> /фунт) .....   | 6966          | 5419           |
| Discharge area (sq ft) (from catalog data)   |               |                |
| = площадь сечения вентилятора градирни с искусственной тягой = $\pi \times 3,5$ фут <sup>2</sup> ..... | 38,5          |                |
| = площадь поперечного сечения градирни с принудительной тягой = $8,2 \times 12$ .....                  |               | 98,4           |
| VJ (= фут <sup>3</sup> /мин на выпускном воздуховоде / площадь сечения выпускного воздуховода) .....   | 2,623         | 799            |
| VJ / VA .....  | 2,98          | 0,91           |
| % рециркуляции (рис. 4) .....  | 2,7           | 4,2            |
| ha (психрометрическая диаграмма или таблица) .....   | 41,58         | 41,58          |
| L (= 1050 галлон/мин $\times$ 8,33) .....  | 8746,5        | 8746,5         |
| R (= 35 – 30) .....  | 10            | 10             |
| n (= число противонаправленных воздухопроводов) .....  | 2             | 1              |
| he (формула на стр. 3) .....   | 41,93         | 43,00          |
| Температура по влажному термометру на воздухозаборнике, °C (психрометрическая таблица) .....           | 78,3          | 79,3           |

### Рекомендации:

Расчетную температуру по влажному термометру для градирен с искусственной тягой рекомендуется повысить на 0,5 °C, для градирен с принудительной тягой – на 1 °C.

---

**SPX COOLING TECHNOLOGIES UK LTD**

3 KNIGHTSBRIDGE PARK, WAINWRIGHT ROAD  
WORCESTER WR4 9FA ВЕЛИКОБРИТАНИЯ  
44 1905 750 270 | [ct.fap.emea@spx.com](mailto:ct.fap.emea@spx.com)  
[spxcooling.com](http://spxcooling.com)

ru\_H-004A | ВЫПУСК 10/2016

COPYRIGHT © 2016 SPX CORPORATION

Изменения конструкции и/или замена материалов с целью усовершенствования изделий могут производиться без уведомления.

