

# Инженерный расчет ночного охлаждения помещения

В общей проблеме энергосбережения достаточно низкая температура наружного воздуха в ночное время даже в теплый период года представляет большой интерес как дешевый источник холода. Однако, надежной методики расчета такого процесса не обнаружено.

(Из подготавливаемой рукописи книги «Проектирование и расчет систем кондиционирования воздуха и вентиляции», Т. I «Полный комплекс исходных данных и расчетной информации для проектирования».)

Автор: А.Г. СОТНИКОВ, д.т.н., профессор

Известны предложения специалистов относительно использования наружного воздуха в технике кондиционирования и охлаждения. Например, Б.С. Тихонов [1, 2] описал возможность охлаждения ночным воздухом воды в градирнях, а А.Н. Колубков и Н.В. Шилкин в статье [3] сослались на опыт Германии в использовании охлаждаемых змеевиками стен зданий, в которые подается холодная вода. В статье [4] приводится графическая зависимость снижения температуры в помещении от 21,5°C в 19 ч до 19–20°C в 5 ч утра от кратности воздухообмена  $k_p = 4, 8$  и  $12$  ч<sup>-1</sup>, однако данные о характеристиках помещения (Iпом, ак.ср и др.) и ходе наружной температуры в ней не указаны.

Ночное охлаждение помещения наружным воздухом — специальная научно-инженерная задача, имеющая заметное значение для охлаждаемых объектов — помещений разного назначения с большими теплоизбытками, где температура воздуха в теплый период года может быть задана интервалом [tв.мин, tв.мах], например 23–28°C. Холод, накопленный в таком случае в поверхностном слое внутренних ограждений и оборудования, аккумулируется ими, и при появлении теплоизбытков поступает в воздух помещения, уменьшая расход подводимого к воздухоохладителю холода и время его использования. Как показывают расчеты, удельное количество аккумулируемого холода может составлять 30–50 Вт/м<sup>2</sup>, что при малом определяющем размере помещения Iпом оказывает существенной величиной:

Одной из первых публикаций на обсуждаемую тему была книга Е.Е. Карписа [5] по энергосбережению в СКВ. В частности, он предложил учитывать «аккумулирующую способность наружных и внутренних ограждений, подвергая их охлаждению или нагреву до появления обычных тепловых нагрузок». Позже в обзорной статье Е.Е. Карпис [6] рассмотрел системы холодоснабжения, использующие наружный воздух, однако к данной задаче он не вернулся. В последнее время к этой теме обратился Е.О. Шилькрот [7]. Среди многочисленных мер энергосбережения он выделил около десяти, по его мнению, основных, среди которых отметил и ночное проветривание.

В основе расчета эффекта ночного охлаждения помещения лежит рассмотрение хода наружной температуры

в теплое время суток и их повторяемость в разных городах (рис. 1), которая имеет наибольшую величину не при пиковых, а при умеренных значениях температур. Представим, что температура наружного воздуха в течение не самых жарких, но характерных летних суток меняется приближенно гармонически по закону:

причем в ночные часы при амплитуде  $A_{т.н} = 5–8°C$  (в СНиП [8] указаны двойные амплитуды!) она существенно ниже  $t_{в.мах}$  и даже  $t_{в.мин}$  (рис. 2).

Включая вентиляцию в ночное время, можно заметно снизить температуру воздуха и одновременно внутренних поверхностей всех ограждений такого помещения. Процесс снижения  $t_{в}(t)$ , показанный на рис. 2, происходит сложным образом под влиянием разных факторов:

- изменения  $t_{н}(t)$ , сначала падения (1–2 на рис. 2), потом подъема (2–3);
- начальной разности температур  $(t_{в} - t_{н})_0$ , соответствующей точкам 1' и 1 в момент включения вентиляции для ночного охлаждения помещения;
- нагрева наружного (приточного) воздуха с учетом потерь энергии в вентиляторе и двигателе на величину:

где  $P_{вент}$  — полное давление вентилятора, кПа;

□ остаточных конвективных тепловыделений в помещении в нерабочее время  $\Delta Q_{изб.к}$ , например теплоты солнечной радиации.

После достижения наружной температурой  $t_{н}$  своего минимального значения (примерно в три-четыре часа утра) начинается ее подъем, поэтому снижение температуры в помещении  $t_{в}$  затормаживается и в какой-то момент времени, соответствующий точке 3 на рис. 2 эти температуры, сближаясь, становятся одинаковыми. С этого момента ночное охлаждение помещения становится неэффективным, и систему вентиляции до начала работы объекта отключают. Заметным преимуществом ночного охлаждения является то, что по времени оно совпадает или близко времени действия льготного ночного тарифа.

Расчет снижения температуры в ночное время для каждого часа можно производить по формуле:

где  $D_{тн}(t)$  — снижение температуры наружного воздуха от начала ночного охлаждения помещения до момента  $t$ , ч;  $(t_{в} - t_{н})_0$  — начальная разность температур внутреннего и наружного воздуха в момент начала ночного охлаждения, °C;  $D_{тпр}$  — нагрев приточного воздуха, °C;  $DQ_{изб.к}$  — избыточные конвективные тепловыделения в нерабочее время, кВт;  $L_{пр}$  — расход приточного воздуха в режиме ночного охлаждения помещения, м<sup>3</sup>/с;  $ak.cр$  — средний коэффициент конвективного теплообмена на поверхностях ограждений помещения, зависящий от вида приточных струй (настилающиеся, отрывные) и кратности воздухообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $q_{пов}$  — относительное изменение температуры поверхности ограждений, определяемое по методике А.В. Лыкова [9]:

$k_p$  — кратность воздухообмена в помещении, ч<sup>-1</sup>;  $I_{пом}$  — определяющий размер помещения, м:

$t$  — время, отсчитываемое от момента начала ночного охлаждения помещения. В формуле (2) последним слагаемым знаменателя  $1/tk_p$  можно пренебречь.

Кроме расчета снижения температуры воздуха в помещении важно вычислить удельное количество холода (Вт·ч/м<sup>2</sup>), запасенного при ночном охлаждении в тонких слоях со стороны внутренних поверхностей ограждений и оборудования. Эту величину можно определить по формуле:

Удельные затраты электроэнергии на ночное проветривание помещения не однозначны и зависят от того, какая система (приточная, вытяжная, обе вместе) обеспечивают перемещение воздуха. В общем случае, когда работают приточный и вытяжной вентиляторы, удельный расход энергии, отнесенный к единице площади ограждений помещения [Вт·ч/м<sup>2</sup>] можно определить по формуле:

где  $P_{в.пр}$  и  $P_{в.выт}$  — полное давление приточного и вытяжного вентиля-

торов, кПа;  $h_{вент}$ ,  $h_{дв}$  — КПД вентилятора и электродвигателя, безразмерно. Варьируя разные способы ночного проветривания, включая открытие окон и механическую вытяжку, можно достичь минимальных затрат электроэнергии на ночное проветривание. Для сравнения приведем зависимость для удельного расхода электроэнергии на выработку холода, эквивалентного тому расходу, который аккумулирован ограждениями помещения:

где  $Dq_{акк}$  — удельное количество аккумулируемого стенами холода, Вт·ч/м<sup>2</sup>, определяемое по формуле (3);  $N_{э}$  — относительная доля мощности двигателей насосов и вентиляторов, используемых для выработки холода, по отношению к мощности холодильного компрессора;  $m$  — холодильный коэффициент водоохлаждающей машины, равный отношению холода, получаемого в испарителе к мощности компрессора;  $h_{дв}$  — КПД электродвигателя компрессора. При сравнении ночного охлаждения помещения с охлаждением в дневное время с помощью холода, получаемого в водоохлаждающей машине, надо учитывать различие тарифов на электроэнергию в ночное и дневное время, которое может достигать двух- и трехкратного, и различие мощностей, потребляемых этой машиной и вентиляторами при ночном охлаждении. Поясним методику расчета ночного охлаждения помещения примером.

### Пример

Расчитать режим охлаждения помещения размерами  $l_b \cdot h = 5_4 \cdot 3$  м, объемом  $V_{пом} = 60$  м<sup>3</sup>, площадью ограждений и оборудования  $S_{Forp} = 94$  м<sup>2</sup>, характерным размером:

при использовании механической приточно-вытяжной вентиляции, давлении вентиляторов  $P_{в.пр} = 0,7$  кПа и  $P_{в.выт} = 0,3$  кПа, производстве КПД  $h_{вент}h_{дв} = 0,7$ , при кратности воздухообмена в помещении  $k_p = 4$  ч<sup>-1</sup>, среднем коэффициенте конвективного теплообмена на поверхностях  $ak.cр = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C), если в рассматриваемые сутки температура наружного воздуха изменится приближенно-гармонически по уравнению:

что показано на рис. 2. Время работы объекта — с 9 до 18 ч, время ночного охлаждения — с 22 до 4 ч утра, т.е.  $D_{тн.охл} = 6$  ч. В расчетах принимаем согласно рис. 2:

$$(t_{в} - t_{н})_0 = 26 - 20 = 6^{\circ}C,$$

$$\Delta t_{н} = 20 - 13 = 7^{\circ}C, \Delta t_{тпр} = 1^{\circ}C,$$

избыточные тепловыделения в ночное время  $\Delta Q_{изб.к} = 0$ .

Теплофизические характеристики материалов вблизи внутренних поверхностей ограждений принять:  $c_m = 840$  Дж/(кг·°C),  $\rho_m = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $l_m = 0,7$  Вт/(м·°C). Определить удельный расход холода, аккумулируемый поверхностями ограждений [(Вт·ч)/м<sup>2</sup>], удельные затраты электроэнергии при работе вентиляторов в системе ночного охлаждения [(Вт·ч)/м<sup>2</sup>] и удельные затраты холода, вырабатываемого водоохлаждающей машиной, [(Вт·ч)/м<sup>2</sup>] при холодильном коэффициенте  $m = 4$ , КПД двигателя компрессора  $h_{дв} = 0,85$  и относительной мощности двигателей насосов и вентиляторов, используемых водоохлаждающей машиной  $N_{э} = 0,3$ .

Предварительно вычисляем комплексный теплофизический критерий  $M$  к моменту времени  $\Delta t_{н.охл} = 6$  ч:

чему соответствует величина  $1 - q_{пов} = 0,65$ . Снижение температуры воздуха в помещении по формуле (2) будет равно  $-4,7^{\circ}C$ :

Повторим расчет для моментов времени  $\Delta t_{н.охл} = 2$  и  $4$  ч, чему соответствует критерий  $M = 0,05$  и  $0,10$ , величина  $1 - q_{пов} = 0,85$  и  $0,78$ , а снижение температуры  $D_{тв} = -3^{\circ}C$  и  $-4^{\circ}C$ . Усредняя эти данные, определим удельное количество аккумулируемого холода по формуле (3):

$$Dq_{акк} = 2_4,7_0,65_6 = 37 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2,$$

общий расход аккумулируемого холода:

$$DQ_{акк} = 37_94_10-3 = 3,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Удельные затраты энергии на ночное охлаждение помещения при работе приточного и вытяжного вентиляторов по формуле (4) равны  $22$  Вт·ч/м<sup>2</sup>:

при использовании только вытяжного вентилятора эта величина снижается в три раза. При использовании в днев-

ное время водоохлаждающей машины удельный расход электроэнергии по формуле (5) составит  $14 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ :

Обсуждая результаты расчета, отметим, что при ночном охлаждении и открытых окнах можно использовать только вытяжной вентилятор, что значительно сократит расход энергии, однако это может быть недопустимым из-за отсутствия очистки поступающего наружного воздуха. Использование водоохлаждающей машины, работающей в дневное время при соответствующем тарифе, потребует больших затрат, чем ночное охлаждение помещения наружным воздухом при соответствующем льготном тарифе.

При оценке эффекта использования ночного охлаждения в теплое время года нужно принимать среднюю по повторяемости ночную температуру согласно рис. 1 и ее амплитуду по СНиП [8]. ●

1. Тихонов Б.С. Использование естественного холода и психрометрической разности температур ночного воздуха в системах технологического кондиционирования // Водоснабжение и санитарная техника, №6/1970.
2. Тихонов Б.С. Аккумуляционные системы кондиционирования воздуха // Водоснабжение и санитарная техника, №9/1971.
3. Колубков А.Н., Шилкин Н.В. Новый подход к кондиционированию. Опыт Германии // АВОК, №1/2009.
4. Маркевич А.С., Рымаров А.Г. Особенности учета факторов, влияющих на воздушно-тепловой режим помещения при применении ночного проветривания в теплый период года / В кн.: Материалы 3-й Международной конференции «Теоретические основы теплогаснабжения и вентиляции». — М.: МГСУ, 2009.
5. Карпис Е.Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Экономия топлива и электроэнергии. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1986.
6. Карпис Е.Е. Системы хладоснабжения с использованием наружного воздуха. (Обзор зарубежной техники) // Холодильная техника, №6/1989.
7. Шилькрот Е.О. Эффективное использование энергии — где и как? // АВОК, №7/2006.
8. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология. — М.: Госстрой России, 2003.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967.

**DVM PLUS III**<sup>TM</sup>  
DIGITAL VARIABLE MULTI

Одновременное охлаждение и обогрев с системой DVM HR III

**Экономичная**  
Система DVM Plus III потребляет значительно меньше электроэнергии. Коэффициент энергоэффективности COP достигает 4,57.

**Надежная**  
За счет применения технологии прямой инъекции хладагента система DVM Plus III надежно работает в режиме обогрева даже при наружной температуре воздуха  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Мощная**  
Комбинация из четырех наружных блоков обеспечивает системе DVM Plus III мощность до 200 кВт и дает возможность подключить до 64 внутренних блоков.

**Гибкая**  
Свободная комбинация наружных блоков и суммарная длина магистрали до 1 километра гарантирует удобство установки системы DVM plus III в самых сложных проектах.

Подробная информация на сайте: [www.samsung.ru/business/climate](http://www.samsung.ru/business/climate)

Единая служба поддержки Samsung Electronics: 8-800-555-55-55 (для бесплатных звонков из любого региона России). [www.samsung.com](http://www.samsung.com). Товар сертифицирован. Реклама.

\* Навстречу будущему.