

Автор А.Г. СОТНИКОВ, д.т.н., профессор кафедры кондиционирования воздуха СПбГУНПТ, asotnikov@rin.ru

Системы холодоснабжения (СХС) и хладоносители для СКВ



Обоснование необходимости данного цикла

Открывая цикл статей, надеемся, интересных читателям, отметим некоторые особенности описываемых ниже систем холодоснабжения. Эта специальность и направление деятельности инженеров находится на стыке между холодильной техникой и системами микроклимата, а стыки, как известно, «плохо заделаны». Холодильщиков готовят немногие ВУЗы России, а связь с кондиционированием здесь весьма условная. Большое число людей, вовлеченных в орбиту нашей интересной профессии, к сожалению, многие вопросы представляют себе весьма приблизительно. Например, такое расхожее понятие, как холодопроизводительность, относится к холодильной машине, а не к ее испарителю. Правильно называемые центральные водовоздушные СКВ с доводчиками обозначают иностранными словами «чиллер–фанкойл», что неточно и не объясняет существа

данной системы, а точнее принципа ассимиляции избыточной теплоты как наружным воздухом, так и холодной водой в доводчиках. Уместно заметить, что произошедшая в последнее время замена «обычных» центральных воздушных СКВ водовоздушными существенно увеличила годовую продолжительность потребления холода и соответственно сброса теплоты от конденсаторов.

Расхожая терминология в профессии подверглась справедливой критике ряда специалистов. Дошло до того, что практически единицы специалистов представляют себе составляющие расхода холода и соответствующую формулу. Подавляющее большинство глубоко уверены в непогрешимости и единственности известной формулы: расход холода равен расходу воздуха, умноженному на его разность энтальпий. Тут дело не в неверном ответе, а в отсутствующих и не оцениваемых составляющих холодильной нагрузки СКВ, которые должна раскрывать предпочтительная формула [7]. Очень много вопросов накопилось по автономным кондиционерам [8]. При их массовой поставке и монтаже около 400 тыс. штук в год многие вопросы их подбора и реальных тепловоздушных балансов остаются открытыми. Процессы охлаждения–осушения неоднозначны при рассмотрении способов управления ими. До сих пор используют холод, получаемый от испарителя, а холодильную машину подбирают по максимальной часовой нагрузке, не рассматривая обычно никакие другие. В отдельных случаях переключая холодильный цикл или хладоноситель, получают теплоту от конденсатора (режим теплового насоса). Нет даже попыток рассмотреть современную высокоэффективную водоохлаждающую машину как источник возможного круглогодичного одновременного получения зданием и его инженерными системами (СО, СВ, СГВ) как холода, так и теплоты в разных пропорциях. Дефициты теплоты и электроэнергии привлекают к разнообразным холодильным машинам все большее внимание. К сожалению, примеры, подводящие к необходимости более систематизированного изучения данной темы, могут быть продолжены.

Подводя итог этим рассуждениям, автор делает вывод об актуальности и ожидаемой для читателей пользе предлагаемого нами цикла: «**Актуальные проблемы холодоснабжения современных СКВ: теория, практика, примеры**».

Структурная схема центральной системы холодоснабжения СКВ

В структурной схеме СХС (рис. 1), как и в схеме СТС, три основных части: **генератор** — источник холода, обычно водоохлаждающая машина, а также охладитель жидкости, трубопроводы, арматура, баки, насосы и др., **система транспортировки**, связывающая источник, и **потребители** холода: воздухоохладители центральных СКВ, местные вентиляторные охладители, доводчики-охладители и др.

Для классификации СХС СКВ выделяют три основных признака: способ получения холода, способ связи источника и потребителя, способ использования холода. По способу производства холода для СКВ различают использование природных источников (воды, льда), испарительное охлаждение воздуха с учетом психрометрической разницы $\Delta t_H = t_H - t_{HM}$, искусственных источников холода (различные хладоны и хладоносители, комбинированные схемы охлаждения, использующие разные источники одновременно или поочередно). По способу связи источника и потребителя холода различают централизованное и местное холодоснабжение, последнее встроено в автономные кондиционеры [8]. По способу применения холода различают непосредственное использование (хладагента) или использование промежуточного хладоносителя (воды, раствора, льда).

Приближенная классификация систем холодоснабжения СКВ

Системы холодоснабжения СКВ при всем своем различии и многообразии можно различать по таким основным признакам:

- **расчетной холодопроизводительности**, составляющей от нескольких киловатт (комнаты, квартиры, небольшие офисы, кафе, объекты сферы обслуживания населения и др.) до сотен и тысяч киловатт (отдельные много-

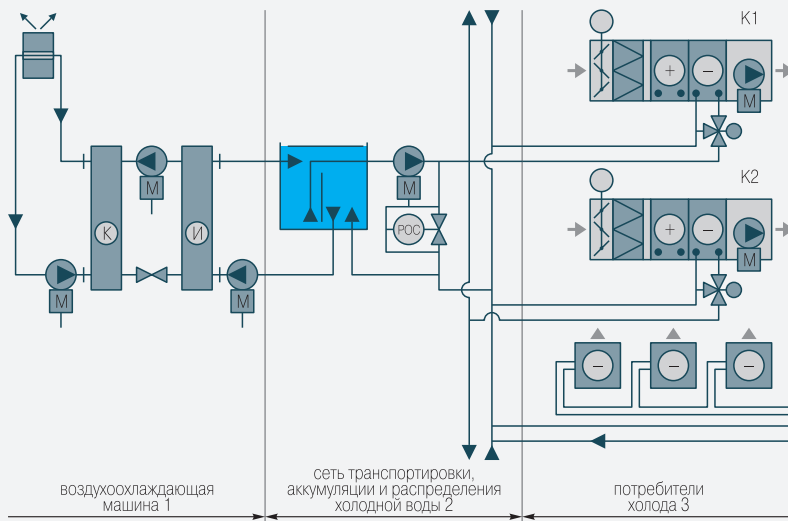


Рис. 1. Схема системы холодоснабжения центральных СКВ и доводчиков-охладителей объекта (1 — источник холода; 2 — сеть транспортировки холодоносителя и потребителей холода — аппаратов СКВ и доводчиков-охладителей 3)

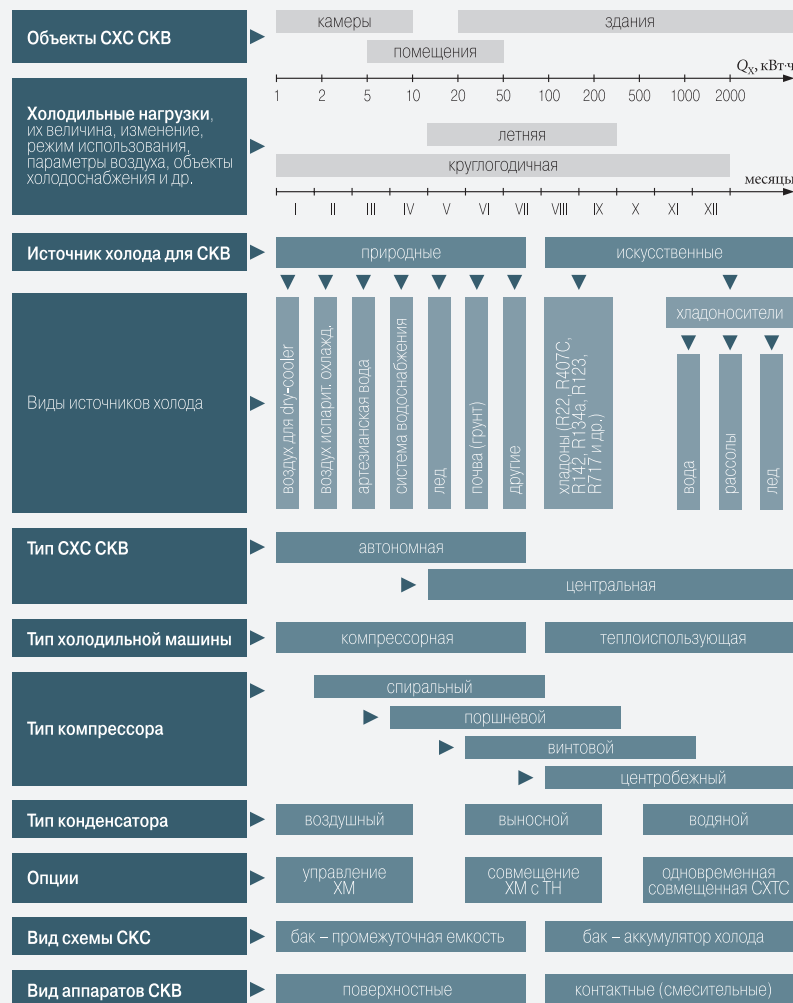


Рис. 2. Классификационный график основных источников холода в СХС СКВ

этажные здания и их комплексы, многофункциональные здания, производственные цеха и др.);

- типу применяемых холодильных машин (и компрессоров): поршневых, винтовых, спиральных, центробежных, абсорбционных, воздушных, термоэлектрических;
- по способу управления холодопроизводительностью: изменением оборотов двигателя компрессора, перепуском хладагента с возвратом после ТРВ, отключением цилиндров, отключением компрессоров, отключением части хладагентных контуров, управлением направляющим аппаратом в турбокомпрессорах и др.;
- по схемным решениям СХС, в частности по аккумуляции холода: с баком-промежуточной емкостью, баком-аккумулятором холодной воды, баком-льдоаккумулятором (со специальным погружным испарителем);
- открытой или закрытой СХС;
- системам на основе хладагентов или хладоносителей;
- по виду холодоносителей и хладоносителей (рис. 2), которые можно разделить на природные (естественные) и искусственные;
- по специальным требованиям объекта к одновременному или поочередному использованию холода и теплоты (режим теплового насоса и др.) с учетом сезонных и годовых нагрузок объекта при разных условиях, температурах $t_{нр}$ в рабочее и нерабочее время, к температуре и виду хладоносителя и др.;
- по типу аппаратов: поверхностных или контактных (смесительных) для охлаждения-осушения обрабатываемого воздуха;
- по способу соединения бака-аккумулятора и нагрузки с холодильной машиной: параллельному или последовательному. Существуют и другие разновидности СХС, но они менее существенны.

Сравнительные особенности хладагентов и хладоносителей в СХС СКВ

При выборе принципиальных решений СХС и типа хладоносителя нужно принимать во внимание многочисленные особенности каждого из них.

Хладагенты по сравнению с промежуточными холодоносителями:

- имеют более низкую температуру кипения и при прочих равных условиях обеспечивают более глубокое охлаждение-осушение воздуха (это важно

■ Производственные помещения и технологические процессы, требующие низкой относительной влажности воздуха табл. 1

Наименование производственного помещения	$t_B \pm \Delta t_B$	$\Phi_B \pm \Delta \Phi_B$	t_{BP} при t_{Bmin}
Фармацевтическое производство:			
□ склады материалов	(20–25)±1°C	(30–35)±5%	3–4°C
□ склады готовых порошков	(20–25)±1°C	(15–35)±5%	-7...4°C
□ цехи готовых порошков	(20–25)±1°C	(15–35)±5%	-7...4°C
□ цехи изготовления препаратов желез	(25–26)±1°C	5–10%	-(25–9)°C
□ цехи склеивания резиновых изделий	25±1°C	(25–30)±5%	3,5–6,5°C
Склады химикатов фотографического производства	16–27°C	(35–50)±7%	0–5°C
Экспонаты музеев*	(18–24)±1°C	(15–40)±5%	-9...4°C

* См. В. Д. Коркин «Особенности кондиционирования воздуха старинных зданий». — Проблемы и перспективы развития систем кондиционирования. СПбГАХИПТ, СПб., 1997.

например, если в помещении с тепловлаговыведениями требуется поддерживать невысокую относительную влажность $\Phi_B = 30\text{--}50\%$), см. табл. 1 [5];

- не влияют на здание и его конструкции при авариях и утечках;
- теплосъем с единицы массы при кипении F22, F142 ($t_{кип} = 5^\circ\text{C}$) составляет $q = 210\text{--}220$ кДж/кг;
- не позволяют изменять температуру поверхности t_F в каждом аппарате при постоянной $t_{кип}$, разве что при циклическом управлении;
- позволяют управлять процессом охлаждения-осушения в релейном и непрерывном режимах;
- предъявляют очень жесткие требования к качеству монтажа и герметичности фреонопроводов и их теплоизоляции, места утечек трудноопределимы;
- позволяют использовать аппарат для нагрева в режиме теплового насоса;
- невозможно обеспечить строго требуемое направление процесса охлаждения-осушения воздуха:

$$\xi_{BO} = \frac{\Delta t_B}{c_B \Delta t_B}$$

в хладоновом воздухоохладителе;

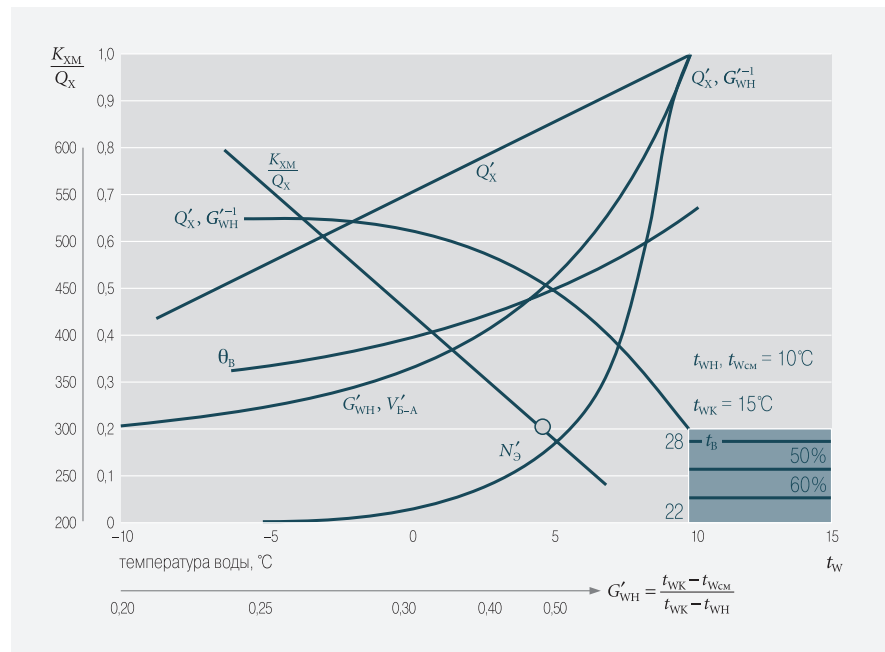
- невозможно применение схем СХС с аккумуляцией холода в емкостях с учетом суточной и сезонной неравномерности потребления холода в объекте.

Хладоносители — вода и рассолы — имеют такие особенности:

- более высокая, но управляемая температура хладоносителя, чем хлад-агента;
- теплосъем с единицы массы при $\Delta t_W = 1^\circ\text{C}$, $q = c_W \Delta t_W = 4,19$ кДж/кг, у рассолов меньше;

- возможность использования аппарата для попеременного охлаждения или нагревания воздуха, впрочем, этим качеством обладают и центральные VRV-системы холодоснабжения с переменным расходом хладона;
- возможность обеспечения разных t_{WCM} , режимов охлаждения и разных (переменных) значений ξ_{BO} ;

- возможность применения холодной воды в контактных аппаратах;
- возможность аккумуляции холода, снижения расчетной холодопроизводительности при такой аккумуляции тепла, снижения капитальных затрат и использование «ночного» тарифа;
- дополнительный эффект снижения расхода жидкости при $t_{WH} < t_{WCM}$ в 2–3 раза в зависимости от условий;
- использование бака в режимах одновременного потребления теплоты и холода;
- сравнительное удобство трансформации схемы, добавлений и изменений в ней;
- легко определяемые места утечек воды в системе холодоснабжения, но опасность «залить» нижерасположенные помещения при авариях;
- ограниченность глубокого охлаждения-осушения воздуха водой, и то, впрочем, достигается рассолами $t_{ЖН} > -10^\circ\text{C}$;



■ Рис. 3. Сводный график основных зависимостей, комплексно характеризующих систему холодоснабжения центральной водовоздушной СКВ с местными доводчиками-охладителями ($t_{WCM} = 10^\circ\text{C}$, $t_{WK} = 15^\circ\text{C}$; $t_{BH} = 25^\circ\text{C}$; $t_{BK} = 15^\circ\text{C}$, $\theta_B = 0,67$) при разных температурах холодной воды/рассола $t_{WH} = -10...10^\circ\text{C}$ (Q_X — изменение относительной холодопроизводительности испарителя холодильной машины (~3%/°C); K_{XM}/Q_X — удельные капзатраты на 1 кВт получаемого холода при изменении температуры кипения хладона и t_{WH} ; N'_3 — относительная мощность на перемещение воды при ее разном относительном расходе G'_{WH} ; комплекс $Q_X G'^{-1}_{WH}$, характеризующий относительное количество холода при разных t_{WH} ; Q_B — эффективность воздухоохладителя местного доводчика при выбранных условиях охлаждения рециркуляционного воздуха; G'_{WH} — относительный расход внешней (холодной) воды, циркулирующей в центральной СХС объекта; V'_{B-A} — относительный объем бака-аккумулятора холода. В правой нижней части — приближенная зависимость температуры точки росы воздуха в зависимости от его температуры и влажности)

- дополнительный контур преобразования (передачи) холода от хладона к хладоносителю и лишняя мощность, используемая в этом контуре;
- уменьшение или исключение дополнительного расхода холода на осушение воздуха в помещениях при использовании местных доводчиков;
- хорошо запроектированная и смонтированная СХС с промежуточным хладоносителем обычно надежнее и долговечнее системы с непосредственным кипением хладона.

Для эффективного использования природных (естественных) источников холода — артезианской воды, водопроводной воды, испарительного охлаждения воздуха за счет разности $t_H - t_{HM}$, льда, почвы и др. нужно учитывать такие соображения:

- совпадение или несовпадение во времени источника и режима его использования (периода года, месяца, времени суток и т.п.);
- достаточность потока холода, массы и температурного уровня для использования в СКВ при охлаждении-осушении воздуха;
- выполнение термодинамических условий, например условия поддержания в помещении $t_B \leq t_{Bдоп}$, а также $\Phi_B \leq \Phi_{Bдоп}$ при использовании данного способа охлаждения-осушения. Предельным при допустимых сочетаниях параметров воздуха ($t_B = 28^\circ\text{C}$; $\Phi_B = 65\%$) можно считать значение $i_{HM} = 60$ кДж/кг (иначе $t_{HM} = 21^\circ\text{C}$) для использования испарительного охлаждения наружного воздуха. Нами предлагается комплексно учитывать этот эффект, как произведение часо-градусов психрометрической разности температур $t_H - t_{HM}$ в теплое время года в данном пункте; для Москвы оно составляет примерно 800 (ч·°C)/год, тогда как в городах Средней Азии эта величина около 2000 (ч·°C)/год.

Приведенное перечисление сравнительных достоинств и недостатков хладоносителей и хладонов по своему влиянию на читателя скорее приведет его к унынию, чем поможет выбрать тот или иной носитель. Поэтому на практике из множества «плюсов» и «минусов» выбирают только главные и, ориентируясь на них, а также на реальное качество монтажа, делают выбор. Опыт специалиста должен помочь ему выбрать наиболее важные качества...

Влияние начальной температуры хладоносителя на СХС СКВ

Очень важной характеристикой системы холодоснабжения является температура воды после испарителя t_{WH} , зависящая от температуры кипения $t_{кип}$ и холодильного цикла. С другой стороны потребители (аппараты СКВ, местные вентиляторные доводчики) предъявляют свои требования к температуре воды в зависимости от протекающих процессов (охлаждение, охлаждение-осушение, устранение конденсации водяного пара из рециркуляционного воздуха и исключение лишнего расхода холода). Поэтому для охладителей кондиционера может потребоваться $t_{WCM} = 5-7^\circ\text{C}$, а для местных рециркуляционных доводчиков-охладителей $t_{WCM} \approx 10-12^\circ\text{C}$ в зависимости от Φ_B и t_{HM} в помещении. Чем более холодная вода подается в аппарат, тем меньше его эффективность θ_B , расчетный расход холодной воды, поверхность и рядность аппарата. На рис. 3 показаны основные

комплексные зависимости, характеризующие систему холодоснабжения при разных температурах холодной воды t_{WH} или рассола.

При потребителях, требующих разную температуру t_{WH} для центральной СХС, выбирают наименьшую, а в объектах, требующих постоянной влажности и зимой при влаговыведениях и десорбции стен (в старинных музеях, культурных объектах, исторических зданиях), для осушения воздуха требуется не вода, а рассол. Комплексный характер взаимосвязанных зависимостей на рис. 3 не позволяет сделать единого, пригодного для всех случаев вывода. Многое зависит от условий объекта и средств «заказчика». С понижением t_{WH} стоимость одной и той же водоохлаждающей машины не меняется, но сокращается объем бака-аккумулятора, сечения трубопроводов, растет эффективность осушения, снижается требуемая эффективность (поверхность, рядность) воздухоохладителей центральной СКВ.

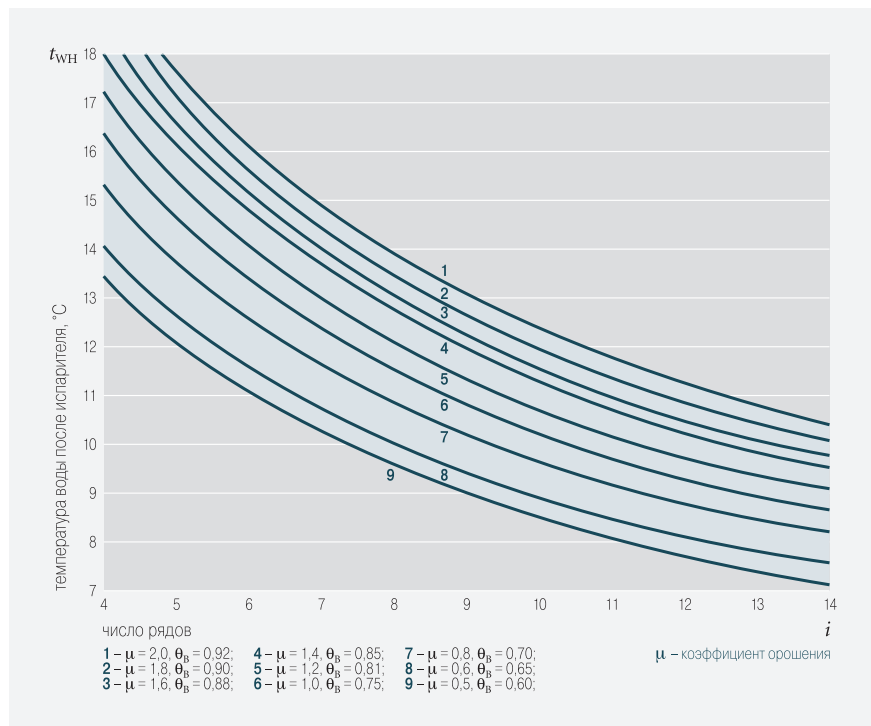


Рис. 4. Номограмма для сравнения эффективности процессов в многорядных поверхностных воздухоохладителях-осушителях ВНИИкондиционер ($F_{пов}/F_{фр} = 16$, коэффициент оребрения ~ 10 , число рядов $i = 4-14$) и типовых двухрядных камер орошения ($n = 18$ шт./ $(\text{м}^2 \cdot \text{ряд})$, $\mu = G_W/G_B = 0,5-2,0$, $d_c = 5$ мм).

Зависимости получены при условии, что камера орошения и поверхностный аппарат обеспечивают одинаковое конечное состояние воздуха при равных расходах воздуха, хладоносителя и температуре воды t_{WH} . Перепад энтальпий воздуха $\Delta i_B = \mu c_W \Delta t_W$. Данные Л.М. Зусмановича и З.П. Добрыниной (ЦНИИЭП инженерного оборудования). Пример: при $\theta_B = 0,07$ и $t_{WH} = 8^\circ\text{C}$ можно применить камеру орошения, ($\mu = 0,8$, $\Delta t_W = 2^\circ\text{C}$) или 14-рядный ВО данной конструкции.

Если за получаемый холод принять относительный комплекс:

$$Q_X G_{WH}^{-1} = f(t_{WH}),$$

то с понижением этой температуры, несмотря на падение Q_X , этот комплекс растет, т.е. можно циркулирующей водой охладить на больший перепад. Если площадь здания, отводимая под бак-аккумулятор холода, весьма ограничена, то для уменьшения $V_{Б-А}$ и занимаемой площади применяют рассол $t_{ЖН} \geq -10^\circ\text{C}$, специальные водоохлаждающие машины или льдогенераторы. Эффект применения бака-аккумулятора холода тем больший, чем меньше относительное время работы СКВ ($\tau_{раб}/24$) и больше суточная неравномерность нагрузки.

Сравнение поверхностных воздухоохлаждателей с контактными

Охлаждение–осушение воздуха можно производить не только в поверхностных, но и контактных аппаратах, например камерах орошения с форсунками, желательнее грубого распыла, что уменьшает влияние испарения в воздух мелких капель и его доувлажнения. Каждый из этих аппаратов имеет свои многочисленные особенности, но сравнивать их не будем, потому что по ряду причин такие камеры орошения сейчас выпускаются ограниченно и только для изоэнтальпийного увлажнения. Сравнительные возможности камер орошения отечественных конструкций по отношению к поверхностным воздухоохлаждателям можно оценить по графику рис. 4. При его разработке принимали, что в обоих аппаратах обеспечивается одинаковое конечное состояние при равных расходах воздуха, хладоносителя и температуре холодной воды t_{WH} . Нельзя забывать, что в аппаратах другой конструкции результат аналогичного сравнения будет другим. Исследования Б.И. Бялого убедительно показали, что можно прогнозировать характеристики процессов охлаждения–осушения в реально выпускаемых камерах орошения и известных характеристиках форсунок на основе известного коэффициента изоэнтальпийного (адиабатического) увлажнения [1–4]. Мы в нашем цикле к этому еще вернемся, а пока нетерпеливому читателю предложим самому разобраться по литературным источникам. Результат будет весьма интересным: камеру орошения для увлажнения воздуха можно использовать при некоторой реконструкции для его охлаждения–осушения в теплый период года. В этом

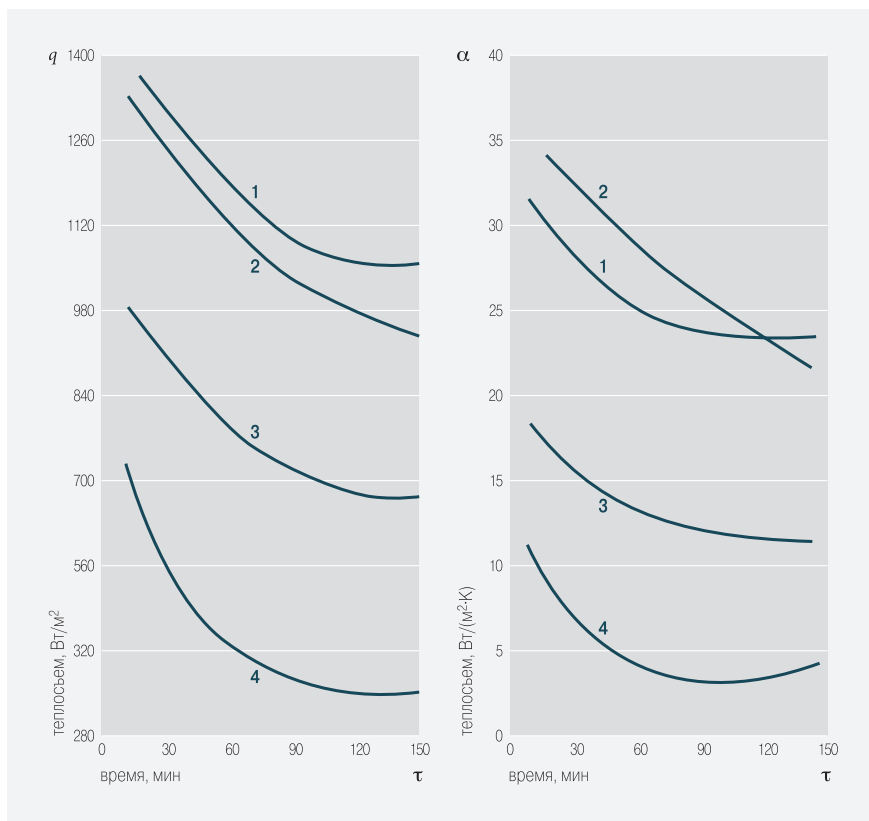


Рис. 5. Изменение тепловых потоков (а) и коэффициентов теплоотдачи (б) при инееобразовании на поверхности пластины (1 — $v_B = 6$ м/с, $d_{B1} = 7,5$ г/кг; 2 — $v_B = 6$ м/с, $d_{B1} = 4,5$ г/кг; 3 — $v_B = 4$ м/с, $d_{B1} = 4,5$ г/кг)

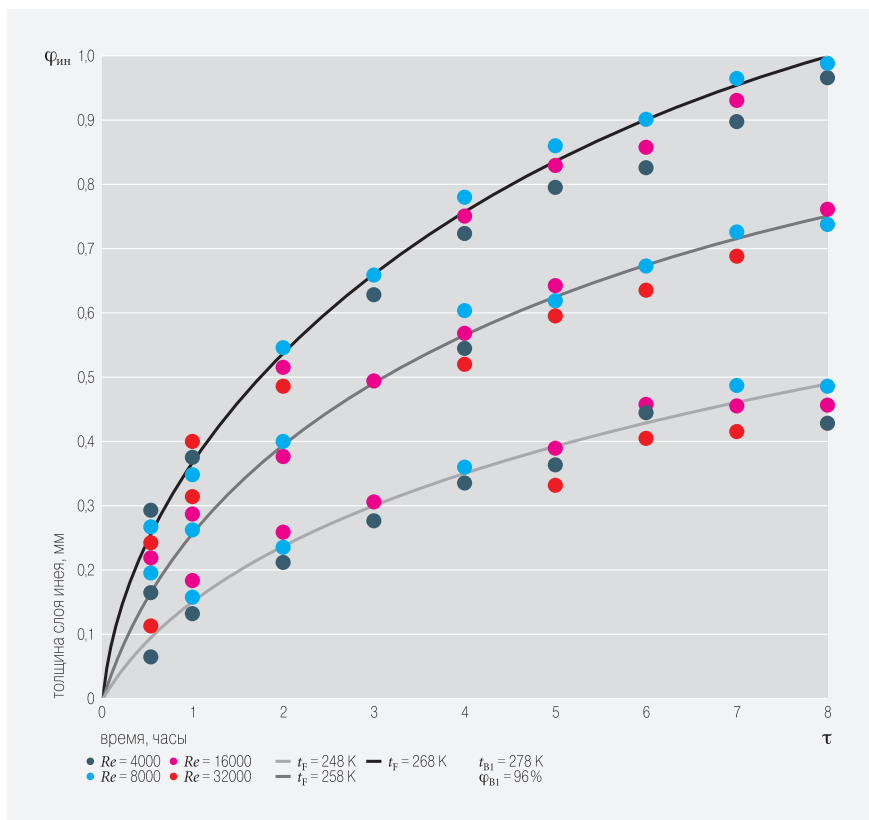


Рис. 6. Изменение толщины слоя инея во времени при различных величинах числа Рейнольдса и температурах поверхности охлаждения на поверхности трубы по данным, приводимым А.А. Поляковым и В.А. Канава [6]

случае поверхностный воздухоохладитель оказывается избыточным.

Низкая относительная влажность, глубокое осушение обрабатываемого воздуха, достигаемое низкой температурой охлаждающей воды ($t_{\text{WH}} = 3-4^{\circ}\text{C}$) и рассолов ($t_{\text{ЖН}} = 0...-10^{\circ}\text{C}$) требуется согласно данным [5] в производствах, указанных в табл. 1.

Механизм инееобразования в поверхностных воздухоохладителях

Для глубокого осушения воздуха в СКВ и поддержания низкой влажности в помещении применяются рассолы; в этом случае при охлаждении влажного воздуха на оребренной поверхности с отрицательной температурой образуется слой инея. Инееобразование меняет характер течения воздуха через аппарат, изменяет состояние наружной поверхности теплообмена, создает дополнительное термическое и аэродинамическое сопротивление. Увеличение слоя инея и изменение его теплофизических свойств приводит к нестационарному характеру процесса теплообмена в охладителе. Знание закономерностей инееобразования [6] (рис. 5) является

обязательным при проектировании подобных эффективных охладителей-осушителей воздуха и выборе оптимальных условий их эксплуатации. Большинство исследований процесса инееобразования носит экспериментальный характер, а их результаты — частный характер. Скорость роста инея является важнейшим параметром для расчета процесса и выбора шага ребер и режима оттайки. Экспериментальные исследования показали (рис. 6), что толщина и плотность слоя инея возрастают пропорционально $\tau^{0,5}$, где τ — текущее время. В каждом из процессов (уплотнения и роста толщины слоя инея) поглощается примерно половина сконденсировавшейся влаги. Увеличение плотности связано с тем, что часть водяных паров диффундирует в слои инея, остальная часть влаги осажается на поверхности слоя инея, увеличивая его толщину.

Вывод: современные системы холодоснабжения центральных и автономных СКВ требуют подробного и детального изучения с целью повышения эффективности их применения и эксплуатации промышленных и гражданских зданиях. □

1. Б.И. Бялый. Обобщенные характеристики центробежных форсунок кондиционеров воздуха. — Вентиляция и кондиционирование воздуха. Рига, РПИ, 1983.
2. Б.И. Бялый. Прогнозирование теплотехнических характеристик горизонтальных камер орошения. — Вентиляция и кондиционирование воздуха. Рига, РПИ, 1983.
3. Б.И. Бялый, А.В. Степанов. Прогнозирование теплотехнических характеристик камер орошения центральных кондиционеров. — Кондиционеростроение. Вып. 12, ВНИИКондиционер», Харьков, 1983.
4. Б.И. Бялый. О взаимосвязи коэффициентов эффективности адиабатического и политропического процессов тепловлажной обработки и отвердевших газов. — Киев: «Наукова думка», 1980.
5. В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин и др. Внутренние санитарно-технические устройства. ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. Изд. 4, перераб. и доп. — М.: «Стройиздат», 1992.
6. А.А. Поляков, В.А. Канаво. Теплообменные аппараты в инженерном оборудовании зданий и сооружений (экономика топлива и электроэнергии). М.: «Стройиздат», 1989.
7. А.А. Рымкевич. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. — Изд. 1, М.: «Стройиздат» 1990; Изд. 2. С-Пб. 2003.
8. А.Г. Сотников. Автономные и специальные системы кондиционирования воздуха. С-Пб.: 2004.