

С. А. Г а р а н о в, А. А. Ж а р о в,
Д. А. П а н т е е в, А. Н. С о к о л и к

ВОДОИСПАРИТЕЛЬНОЕ И КОМБИНИРОВАННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА

Рассмотрены различные способы водоиспарительного охлаждения воздуха, такие как прямое испарительное охлаждение воздуха, косвенно-испарительное охлаждение воздуха, комбинированное (водоиспарительное + парокомпрессионное) охлаждение воздуха. Приведены сравнительный анализ указанных способов, границы применимости каждого из способов, а также технико-экономический анализ некоторых способов.

E-mail: garanov-sergey@yandex.ru

Ключевые слова: испарительное охлаждение, кондиционирование воздуха.

В настоящее время работы по использованию водоиспарительного охлаждения (ВИО) воздуха ведутся как в нашей стране, так и за рубежом. Кондиционеры, в которых используется регенеративное косвенно-испарительное охлаждение (КИО), серийно выпускаются предприятиями “Элсокс” (Россия) [1], Kampfmann [2] (Германия) и Coolerado (США), причем два последних выпускают как чисто водоиспарительные системы, так и комбинированные.

Принцип испарительного охлаждения воздуха основан на термодинамической неравновесности атмосферного воздуха (психрометрической разности температур сухого и мокрого термометров), которая является возобновляемым энергоресурсом для получения холода в установках кондиционирования воздуха (УКВ).

Прямое испарительное охлаждение воздуха. Одним из примечательных свойств воздуха является снижение температуры при его адиабатном увлажнении, такой способ охлаждения называется прямым испарительным охлаждением воздуха.

Теоретическим пределом прямого испарительного охлаждения воздуха является температура мокрого термометра.

Камеры орошения, градирни, испарительные конденсаторы — это далеко не полный список областей применения прямого испарительного охлаждения.

Косвенно-испарительное охлаждение воздуха. Под термином КИО понимается отвод теплоты от основного потока воздуха через разделяющую стенку теплообменника к вспомогательному потоку, который охлаждается за счет испарения в нем воды. При этом основной поток не увлажняется. Теоретическим пределом охлаждения при КИО

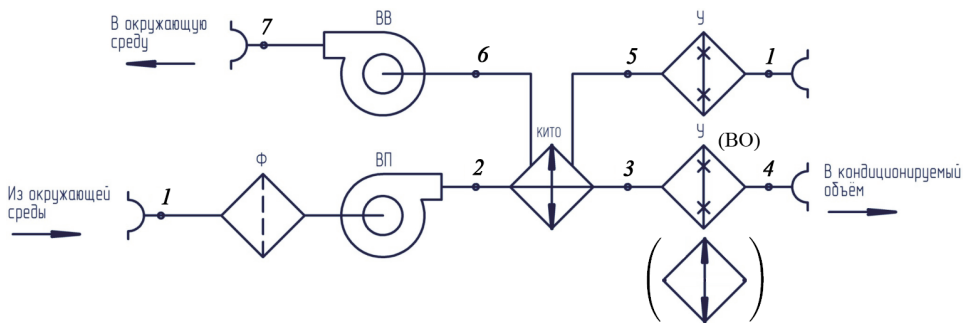


Рис. 1. Принципиальная схема УКВ с двухступенчатым ВАО:

ВП — вентилятор приточный, ВВ — вентилятор вытяжной, У — увлажнитель, Ф — фильтр; (ВО) — хладоновый ВО (для УКВ с комбинированным косвенно-испарительным и парокомпрессионным охлаждением, см. в скобках)

воздуха является температура мокрого термометра воздуха вспомогательного потока.

Двухступенчатое испарительное охлаждение воздуха. В СССР была разработана система кондиционирования воздуха с бескомпрессорным охлаждением воздуха [3], в которой применено двухступенчатое ВАО воздуха. При этом в качестве первой ступени было применено КИО, в качестве второй — прямое испарительное охлаждение воздуха.

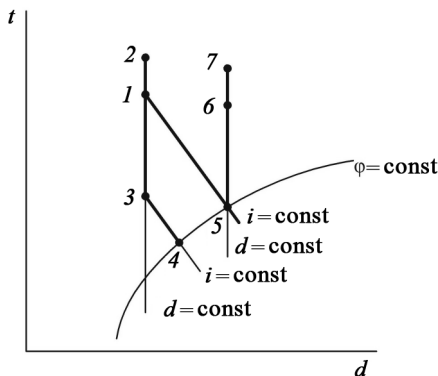
Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Наружный воздух очищается в фильтре, засасывается вентилятором и подается в сухие каналы косвенно-испарительного теплообменника (КИТО), где охлаждается при постоянном влагосодержании. В качестве вспомогательного потока используется наружный воздух, который направляется противотоком основному потоку. Прямой поток на выходе из теплообменника в пределе может достигнуть температуры мокрого термометра наружного воздуха. Далее охлажденный наружный воздух направляется в камеру орошения, где происходит его прямое испарительное охлаждение.

Схема процессов обработки воздуха приведена на психрометрической диаграмме (рис. 2).

Рис. 2. Психрометрическая диаграмма влажного воздуха в УКВ с двухступенчатым ВАО:

1 — наружный воздух; 1-2 — нагрев в вентиляторе прямого потока; 1-5 и 3-4 — адиабатное увлажнение вспомогательного и прямого потоков соответственно; 2-3 — охлаждение прямого потока в КИТО; 5-6 и 6-7 — нагрев воздуха вспомогательного потока в каналах КИТО и вентилятора соответственно



Сравнительный анализ методов ВИО. В таблице приведены результаты расчетов приточных УКВ в различных климатических зонах, характерных для РФ: сухой и жаркий климат (Волгоград, $t_{o,c} = 31,3^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{o,c} = 33\%$); умеренный климат (Москва, $t_{o,c} = 26,3^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{o,c} = 56\%$); влажный климат (Сочи, $t_{o,c} = 27,8^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{o,c} = 68\%$).

Параметры	ВИО				Тип климата
	прямое*	косвенное	двухступенчатое	регенеративное	
Минимальная температура приточного воздуха, $^{\circ}\text{C}$	19,4	21,4	16,2	16,4	Сухой
	19,9	21,9	18,5	20,2	Умеренный
	23,1	25,1	22,4	24	Влажный
Перепад температур, $^{\circ}\text{C}$	11,9	9,9	15,1	14,9	Сухой
	6,4	4,4	7,8	6,1	Умеренный
	4,7	2,7	5,4	3,8	Влажный
Холодопроизводительность, кВт	0	10,13	10,13	15,2	Сухой
	0	4,52	4,52	6,25	Умеренный
	0	2,05	2,05	4	Влажный
Расход воды, л/ч	17,36	17,36	24,96	23,9	Сухой
	9,36	9,36	14,04	11,16	Умеренный
	6,84	6,84	10,8	7,7	Влажный

*Указана температура мокрого термометра, реальная температура будет на 1–2 $^{\circ}\text{C}$ выше.

При расчете УКВ приняты следующие данные: расход прямого потока 1 кг/с (1,5 кг/с для схемы с регенеративным КИО); расход обратного потока 1 кг/с (0,5); разность температур на холодном конце теплообменника 2 $^{\circ}\text{C}$; параметры воздуха на входе в установку — параметры “Б” по СНиП 23-01-99*; нагрев воздуха от вентилятора не учитывается; мощность, потребляемая каждым вентилятором, составляет 0,7 кВт; унос влаги в увлажнителях отсутствует, увлажнение до 100 %-ной относительной влажности.

В результате анализа различных способов ВИО выявили, что обеспечить достаточно низкую температуру приточного воздуха можно, используя двухступенчатое ВИО и регенеративное КИО. При этом двухступенчатое ВИО позволяет достичь более низкой температуры приточного воздуха. Однако при недопустимости дополнительного увлажнения приточного воздуха целесообразно использовать регенеративное охлаждение. Указанные способы ВИО позволяют получить

приемлемые температуры приточного воздуха в сухом и умеренном климате.

Комбинированная УКВ с ВИО и парокомпрессионной ступенью. В настоящее время принцип ВИО не получил широкого распространения в СКВ. Несмотря на высокую эффективность (в сухом климате холодильный коэффициент достигает значения 10–15), ВИО не может обеспечить комфортные параметры микроклимата во всех климатических зонах (таблицу). В качестве автономных кондиционеров применяются в основном парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ) с воздухоохладителями (ВО) непосредственного испарения (сплит-системы) или связка водо-охлаждающая машина–вентиляторный доводчик (“чиллер”–“фанкойл”). Источником холода для ВО центральных кондиционеров также служит охлажденный хладоноситель от чиллера. Холодильный коэффициент связки чиллер–фанкойл составляет порядка 2–3.

В последнее время поступают предложения применить испарительное охлаждение воздуха в комбинации с традиционной ПКХМ [2, 4, 5]. Такая комбинация позволяет с одной стороны снизить нагрузку на холодильную машину (тем самым увеличить коэффициент эффективности системы), с другой стороны, позволит получить комфортные параметры микроклимата во всех климатических зонах.

При проектировании комбинированной водоиспарительной-хладоновой УКВ в качестве первой (водоиспарительной) ступени целесообразно применить КИО и регенеративное ВИО. Использование двухступенчатого ВИО не целесообразно, поскольку ступень с прямым испарительным охлаждением не снижает энтальпии потока и, следовательно, не снижает нагрузку на хладонную часть установки. При использовании УКВ в сухом и умеренном климате наибольшего снижения нагрузки на ПКХМ можно достичь, используя в качестве первой ступени регенеративное КИО. Во влажном климате целесообразно применять блок КИО, используя в качестве вспомогательного вытяжной поток из помещения, имеющий более низкую энтальпию, чем наружный воздух. В этом случае в ступени ВИО можно получить бóльшую холодопроизводительность, чем при использовании регенеративного КИО. Известны схемы, в которых вспомогательный поток, выходящий из КИТО [2, 4], направляется в конденсатор ПКХМ, что позволяет снизить температуру конденсации и, соответственно, затраты на электроэнергию.

В предлагаемом варианте КИТО используется для предварительного охлаждения воздуха, поступающего в ВО парокомпрессионной ступени (см. рис. 1).

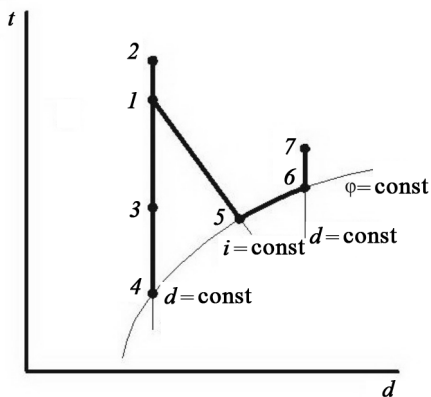


Рис. 3. Психрометрическая диаграмма воздуха в УКВ с комбинированным КИО и парокомпрессионной ступенью (обозначения см. рис. 2; участок 3–4 — охлаждение прямого потока в хладоновом ВО)

Охлажденный очищенный в фильтре наружный воздух направляется в поверхностный хладоновый ВО, где охлаждается до требуемой температуры притока. Следует отметить, что в качестве вспомогательного потока может использоваться как наружный, так и вытяжной воздух из помещения, энтальпия которого может быть ниже энтальпии наружного воздуха, что позволит увеличить часть холодопроизводительности установки, вырабатываемой ступенью ВИО.

Схема процессов обработки воздуха приведена на рис. 3.

Достоинства рассматриваемой схемы следующие: снижение нагрузки на холодильную машину и уменьшение типоразмеров компрессора (по сравнению с ПКХМ); расширение климатических границ применимости (по сравнению с ВИО). Предлагаемая схема имеет следующие недостатки: усложнение конструкции по сравнению с ПКХМ и большее энергопотребление по сравнению с ВИО.

Сравнение энергоэффективности приточно-вытяжных установок. Современная концепция энергосбережения при жилищном строительстве предусматривает рекуперацию теплоты вытяжного воздуха. Этот способ действительно помогает снизить расходы на вентиляцию в холодный период года, однако практически бесполезен в теплое время, когда требуется кондиционирование воздуха.

Использование ВИО позволяет снизить затраты на кондиционирование воздуха как в теплый, так и в холодный периоды времени года.

Проведем сравнение комбинированной водоиспарительной установки (см. рис. 1) и классической приточно-вытяжной установки с рекуператором (рис. 4).

Предлагаемая схема (см. рис. 1) имеет три основных отличия от классической приточно-вытяжной установки:

- 1) наличие увлажнителя на тракте обратного потока;
- 2) использование КИТО вместо обычного рекуператора;
- 3) обдув конденсатора холодильной машины обратным потоком.

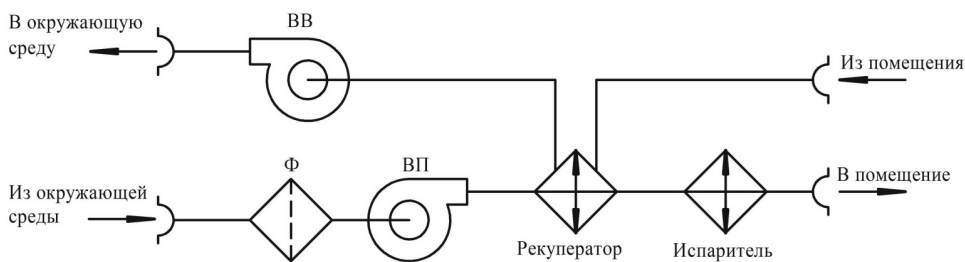


Рис. 4. Принципиальная схема приточно-вытяжной УКВ с рекуператором

Расчет был выполнен при следующих условиях:

Расход прямого и обратного потоков 1 кг/с каждый; температурная эффективность рекуператора и КИТО 0,75; параметры воздуха на входе в установку — параметры “Б” по СНиП 23-01-99*; температура приточного воздуха 14 °С; температура воздуха и относительная влажность в помещении 25 °С и 55 % соответственно; температура кипения 7 °С; температура конденсации и мощность вентиляторов, кВт, переменные; хладагент — R407C.

Результаты сравнения установок приведены на рис. 5 и 6.

Как следует из приведенных диаграмм, использование КИТО вместо рекуператора во всех климатических зонах позволяет увеличить в 1,5-2 раза коэффициент эффективности системы; в условиях сухого и умеренного климата позволяет значительно снизить мощность, потребляемую компрессором, количество хладагента, заправляемого в систему. Снизить установленную мощность установки в целом, а следовательно, и затраты на подключение к городским электросетям.

В настоящее время для определения эффективности применения комбинированных циклов на базе лаборатории кафедры Э-4 МГТУ

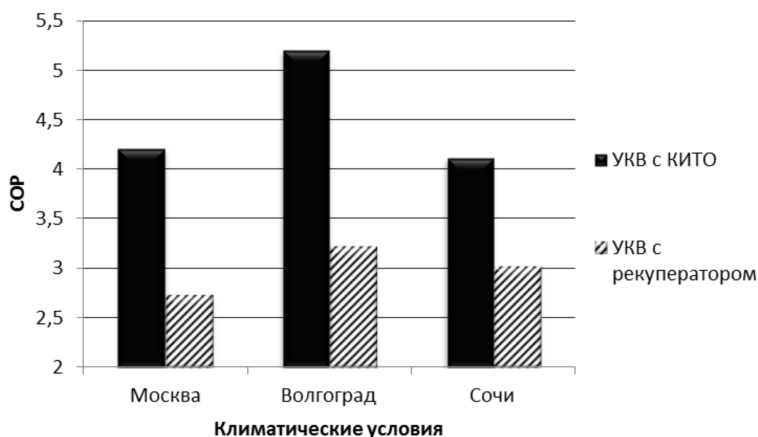


Рис. 5. Коэффициенты эффективности сравниваемых установок в различных климатических зонах (параметры подаваемого воздуха и воздуха в помещении постоянны)



Рис. 6. Электрическая мощность, потребляемая компрессорами сравниваемых установок, в различных климатических зонах (параметры подаваемого воздуха и воздуха в помещении постоянны)

им. Н.Э. Баумана разрабатывается лабораторный стенд, использующий комбинированный водоиспарительно-парокомпрессионный цикл, для исследования работы подобных установок при различных параметрах воздуха окружающей среды. Разрабатываемый стенд будет использоваться в учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЗАО “НПО “ЭЛСОКС” (рекламный буклет). 2006.
2. K a m p m a n n Ausgabe 276/02/09/40 DE.
3. К о к о р и н О. Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
4. M e n e r g a GmbH Typreihe 57/58 Adsolair E-03/1999.
5. Д о р о ш е н к о А. В. Испарительные охладители комбинированного типа для систем кондиционирования воздуха // АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2005. – № 6. – С. 58–63.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012