УДК 628.8 + 697.9

Использование в СКВ воздухоосушителей, основанных на применении сорбентов

Канд. техн. наук **Н. В. КОЧЕНКОВ**
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

The article discusses one of the reasons for possible overruns of energy in air conditioning systems, due to the presence of mutually exclusive processing air. The authors show what factors affect the amount of overhead and how essential it may be their effect. To resolve conflicting processes are encouraged to use the desiccant dehumidifier. Considered modes of operation, the technique of determining the feasibility of its use in air conditioning systems.

Keywords: air conditioning system, an adsorption dehumidifier, energy-expenditure, class loads in the room, the design area, the vector of the process, the mode of operation.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, адсорбционный воздухоосушитель, перерасход энергоресурсов, класс нагрузок в помещении, расчетная зона, вектор процесса, режим функционирования.

Целесообразно ли использование в системах кондиционирования воздуха (СКВ) воздухоосушителей, основанных на применении поглотителей водяного пара из воздуха (сорбентов)? При каких условиях это оборудование действительно необходимо, а когда его использование экономически нецелесообразно? Какими должны быть режимы функционирования этого оборудования, с тем, чтобы обеспечить эффективное использование энергетических ресурсов, потребляемых в СКВ?

Целью данной статьи является показать, каким должен быть подход к рассмотрению обозначенных вопросов.

Одна из причин перерасходов энергоресурсов в СКВ

Одним из распространенных процессов тепловлажностной обработки воздуха в СКВ для теплого периода года является его охлаждение с одновременным понижением влагосодержания, т. е. осушкой. Осушка воздуха в этом случае достигается за счет его охлаждения ниже температуры точки росы.

Такой процесс осушки обычно называют механическим или конденсационным. Реализован он может быть в теплообменных аппаратах как поверхностного, так и контактного (смесительного) типов.

При определенных условиях процесс осушки воздуха, сопровождающийся его охлаждением, может оказаться неэффективным с точки зрения использования потребляемых энергоресурсов, поскольку после охлаждения и осушки воздуха может потребоваться его нагрев. Наличие этих взаимоисключающих процессов (охлаждение « нагрев) является причиной перерасходов теплоты и холода. В зависимости от конкретных условий функционирования СКВ эти перерасходы могут быть как пренебрежимо малыми, так и весьма существенными.

На рис. 1 показаны два фрагмента расчетных термодинамических схем (для I (а) и IV (б) классов нагрузок в помещении) с расчетными зонами 9, 10, 11, 12, в которых может реализовываться процесс охлаждения воздуха с осушкой. Здесь и далее используется терминология, принятая в работе [1]: исходная термодинамическая схема (ИТС), опорная точка ИТС, расчетная термодинамическая схема (РТС), класс нагрузок в помещении, расчетная зона, вектор режима функционирования, вектор процесса, минимально-неизбежный и максимально-целесообразный расходы наружного воздуха. В расчетных зонах 9 и 10 осушка наружного воздуха требуется лишь в том случае, если его влагосодержание будет больше, чем влагосодержание опорных точек $\hat{Н}_В$ (для зоны 9) и $\check{Н}_В$ (для зоны 10).

Из этих расчетных зон, только в зоне 12 имеют место перерасходы теплоты $\Delta q_Т$ и холода $\Delta q_Х$. Напомним, что в этой расчетной зоне вектор режима функционирования $Н_{12}\check{Н}_В$ (на рис. 1 он не показан) состоит из двух процессов обработки воздуха: охлаждения с осушкой (вектор $Н_{12}Х_{12}$) и нагрева (вектор $Х_{12}\check{Н}_В$).

Представим вектор $Н_{12}Х_{12}$ состоящим из двух векторов: $Н_{12}Х^*_{12}$ и $Х^*_{12}Х_{12}$, где точка $Х^*_{12}$ является местом пересечения изоэнтальпы $I_{\check{Н}_В}$ и вектора $Н_{12}Х_{12}$. Вектор $Н_{12}Х^*_{12}$ не связан ни с какими перерасходами теплоты $\Delta q_Т$ и холода $\Delta q_Х$. Последние начинаются только тогда, когда требуемый вектор дальнейшей осушки $Х^*_{12}\check{Н}_В$ реализуется за счет двух процессов обработки воздуха: охлаждения с осушкой (вектор $Х^*_{12}Х_{12}$) и нагрева (вектор $Х_{12}\check{Н}_В$). На рис. 1 эти вектора показаны пунктиром. Именно в указанном способе реализации вектора $Х^*_{12}\check{Н}_В$ заложена причина перерасходов теплоты $\Delta q_Т$ и холода $\Delta q_Х$, поскольку уменьшение влагосодержания воздуха от $d_{Х^*_{12}}$ до $d_{Х_{12}}$ (что является положительным эффектом) сопровождается ненужным понижением его энтальпии с $I_{Х^*_{12}}$ до $I_{Х_{12}}$. Поэтому, для того чтобы вернуть значение энтальпии $I_{Х_{12}}$ к ее первоначальному $I_{Х^*_{12}}$, как раз и требуется процесс нагрева (вектор $Х_{12}\check{Н}_В$).

Таким образом наличие взаимоисключающих процессов обработки воздуха при реализации вектора $Х^*_{12}\check{Н}_В$ в расчетной зоне 12 является причиной перерасходов теплоты $\Delta q_Т$ и холода $\Delta q_Х$. Причем для IV класса нагрузок (т. е. когда в помещении имеет место дефицит тепло-

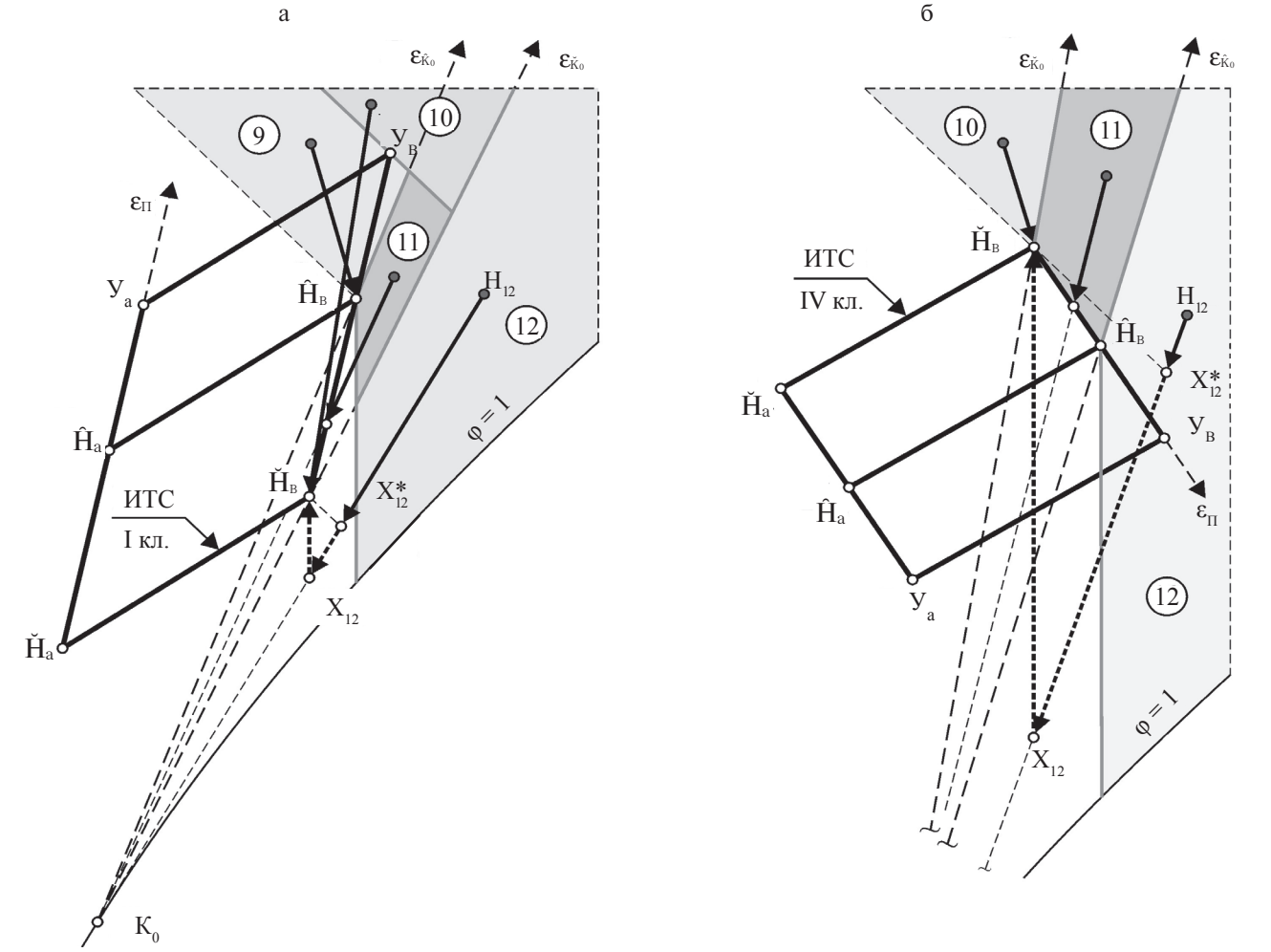

Рис. 1. Фрагменты расчетных термодинамических схем для I (а) и IV (б) класса нагрузок в помещении

ты) эти перерасходы могут оказаться довольно существенными. Это видно даже наглядно по длине векторов, показанных пунктиром на рис. 1, б.

Случай, когда точка наружного воздуха $Н_{12}$ располагается ниже изоэнтальпы $I_{Ĥ_В}$, на рис. 1 не показан. Однако для этого случая, все выше изложенное, сохраняется с той лишь разницей, что точка X^*_{12} будет совпадать с точкой $Н_{12}$, а поэтому вектор $Н_{12}X^*_{12}$ будет отсутствовать. Для перерасходов $\Delta q_Т$ и $\Delta q_Х$ далее будет использоваться общее обозначение $\Delta q_{Т\,(Х)}$.

При II и III классах нагрузок в помещении механический (конденсационный) способ осушки воздуха не сопровождается перерасходами энергоресурсов, поскольку расчетная зона 12 здесь отсутствует, а в расчетных зонах, имеющих место при этих классах нагрузок, взаимоисключающих процессов нет.

Факторы, влияющие на значения перерасходов энергоресурсов при взаимоисключающих процессах в СКВ

Какие же факторы оказывают влияние на значение перерасходов теплоты и холода $\Delta q_{Т\,(Х)}$ в расчетной зоне 12 и насколько существенным может оказаться их влияние?

Прежде всего это тепло- ($q_П$), влаговыделения ($W_П$) в помещении и минимально-неизбежный расход наружного воздуха $m_{Ĥ}$. Эта информация определяет положение исходной термодинамической схемы (ИТС) на *I-d*-диаграмме и класс нагрузок в помещении. Чем выше на *I-d*-диаграмме будет располагаться опорная точка $Ĥ_В$, тем большими становятся перерасходы теплоты и холода $\Delta q_{Т\,(Х)}$ в расчетной зоне 12. Это наглядно видно на рис. 1, где при IV классе нагрузок длина векторов $X^*_{12}X_{12}$ и $X_{12}Ĥ_В$ (они показаны пунктиром) значительно превышает длину аналогичных векторов при I классе нагрузок.

Наряду с классом нагрузок на величину перерасходов энергоресурсов в расчетной зоне 12 влияние оказывают также климат, характерный для географического района расположения объекта, и верхнее нормируемое значение относительной влажности воздуха в помещении (т. е. в точке $У_в$ — $\varphi_{У_В}$). Покажем на примере I класса нагрузок, насколько существенным может оказаться влияние этих двух последних факторов на перерасходы теплоты и холода $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$. Знак Σ в обозначении $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ указывает на то, что здесь рассматриваются суммарные перерасходы энергоресурсов в целом по расчетной зоне 12 за год. Заметим, что при IV классе нагрузок в помещении результаты будут еще более значимыми.

Исходные данные для примера.

Нормируемые параметры воздушной среды в помещении:

— температура 20–24 °С; относительная влажность от 40% до (50, 60, 70) %;

— удельные (на 1 м² площади) тепло- ($q_П$) и влаговыделения ($W_П$) в помещении:

$q_П$ = 0,05 кВт/м²; $W_П$ = 0,011 г/(с · м²);

— минимально-неизбежный расход наружного воздуха $m_{\breve{Н}} = 0{,}0025$ кг/(с · м²);

— максимально-целесообразный расход наружного воздуха $m_{\breve{Н}}$ равен расходу $m_{\breve{Н}}$ (поэтому на ИТС опорные точки $\hat{Н}_а$ и $\hat{Н}_В$ будут совпадать с опорными точками $\breve{Н}_а$ и $\breve{Н}_В$, соответственно);

— температура точки $К_0$, характеризующей предельное состояние воздуха после его политропной обработки: $t_{К_0} = 4$ °С;

— линии Кл, ограничивающие области климата на *I-d*-диаграмме, для 10 городов.

Требуется оценить влияние климата и верхнего нормируемого значения $\varphi_{Ув}$ на перерасходы теплоты и холода $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ в расчетной зоне 12. Поскольку значения $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ зависят от продолжительности (суммарного времени) этой расчетной зоны (τ_{12}, ч) в году, то требуется оценить также влияние этих факторов на время τ_{12}.

Результаты решения этой задачи сведены в таблицу. Для решения задачи была использована расчетная программа, разработанная под руководством профессора А. А. Рымкевича.

Зависимость продолжительности времени τ_{12} от климата и от значения $\varphi_{Ув}$ (зависимость вида $\tau_{12} = f$ (климат, $\varphi_{Ув}$) в количественном выражении характеризуется результатами расчетов, приведенными в колонках 2–4. Зависимость значений перерасходов теплоты и холода $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ от тех же двух факторов (зависимость вида $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)} = f$ (климат, $\varphi_{Ув}$) в количественном выражении характеризуется результатами расчетов, приведенными в колонках 5–8.

При этом в колонках 5, 6 значения $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ выражены в кВт·ч/м², а в колонках 7, 8 — в %. Годовые расходы теплоты $\Delta q^{\Sigma}_{Т}$ и холода $\Delta q^{\Sigma}_{Х}$ (колонки 9, 10) приведены только для того, чтобы рассчитать значения перерасходов $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ в процентах. Все результаты, приведенные в колонках 5–10, получены при $\varphi_{Ув} = 60\%$. При других значениях $\varphi_{Ув}$ они, безусловно, изменятся, причем пропорционально изменению значения времени τ_{12}.

В целом результаты расчетов, приведенные в табл. 1, указывают на то, что климат и верхнее нормируемое значение относительной влажности $\varphi_{Ув}$ оказывают существенное влияние на перерасходы теплоты и холода $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$ в расчетной зоне 12. В зависимости от значений $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)}$, имеющих место при конкретных условиях функционирования СКВ (классе нагрузок, климате, значении $\varphi_{Ув}$), должен делаться вывод о том, стоит ли принимать во внимание эти перерасходы и искать способ их устранения или же ими можно пренебречь.

Как устранить взаимоисключающие процессы в СКВ?

Для исключения перерасходов теплоты и холода в расчетной зоне 12 требуется устранить имеющие место в этой зоне взаимоисключающие процессы обработки воздуха. Для этого необходимо использовать оборудование с такой технологией осушки, которая позволит непосредственно реализовать вектор $Х^*_{12}\breve{Н}_В$ (см. рис. 1).

В качестве такого оборудования должны использоваться воздухоосушители, основанные на применении поглотителей водяного пара из воздуха (сорбентов). Воздухоосушители такого типа обычно называют адсорбционными. Осушка воздуха в них твердыми сорбентами (в качестве которых чаще всего используется силикагель) значительно эффективнее осушки с помощью водных растворов солей [2]. Процесс изменения состояния воздуха при прохождении им слоя силикагеля (вектор $Х^*_{12}\breve{Н}_В$) изображается на *I-d*-диаграмме изоэнтальпой [3].

Рассмотрим, какими должны быть режимы функционирования адсорбционного воздухоосушителя в расчетной зоне 12 для случаев, когда $m_{\breve{Н}} = m_{\hat{Н}}$ (рис. 2) и $m_{\breve{Н}} \neq m_{\hat{Н}}$ (рис. 3).

При $m_{\breve{Н}} = m_{\hat{Н}}$ расчетная зона 12 делится изоэнтальпой $I_{Х^*_{12}}$ на две части. В верхней ее части (при $I_{Н_{12}} > I_{Х^*_{12}}$) должен использоваться комбинированный способ осушки, при котором наружный воздух в точке $Н_{12}$ сначала охлаждается с осушкой до точки $Х^*_{12}$ конденсационным способом, а далее процесс обработки (вектор $Х^*_{12}\breve{Н}_В$) продолжается уже в подсистеме адсорбционной осушки. При этом в помещении поддерживаются параметры воздуха, соответствующие точке $У_в$. Именно такой способ осушки воздуха целесообразно использовать для случая,

Зависимости $\tau_{12} = f$ (климат, $\varphi_{Ув}$) и $\Delta q^{\Sigma}_{Т(Х)} = f$ (климат, при $\varphi_{Ув} = 60\%$)

Название города	Значение продолжительности τ_{12}, ч, при различных значениях относительной влажности точки $У_в$ ($\varphi_{Ув}$)			Суммарные перерасходы теплоты и холода в расчетной зоне 12				Годовые значения расходов теплоты и холода	
				при $\varphi_{Ув} = 60\%$					
				$\Delta q^{\Sigma}_{Т}$	$\Delta q^{\Sigma}_{Х}$	$\Delta q^{\Sigma}_{Т}$	$\Delta q^{\Sigma}_{Х}$	$q^{\Sigma}_{Т}$	$q^{\Sigma}_{Х}$
	50%	60%	70%	кВт·ч/м²		%		кВт·ч/м²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Астана	6943	5767	3948	94,1	92,4	61,9	26,6	152,1	347,6
Диксон	747	137	23	2,0	1,8	0,4	60	531,5	3,0
Киев	4429	2636	1018	34	33,1	17,4	29,7	195,6	111,5
Минск	3984	2277	772	31	29,8	13,9	37,3	223,4	80
Москва	3483	2019	707	26,6	25,5	10,1	33,8	242,7	75,4
Мурманск	1970	594	78	7,6	7,0	2,6	48,3	287,5	14,5
Рига	3950	2378	800	33,8	32,6	15,8	42,4	213,7	76,8
Санкт-Петербург	3513	2014	661	28	26,4	12,3	39,9	227,6	66,2
Miami (USA)	8687	8563	7979	146,8	146,8	98,6	18,6	148,9	788,5
Helena (USA)	2000	0	0	0	0	0	0	175,6	17,9

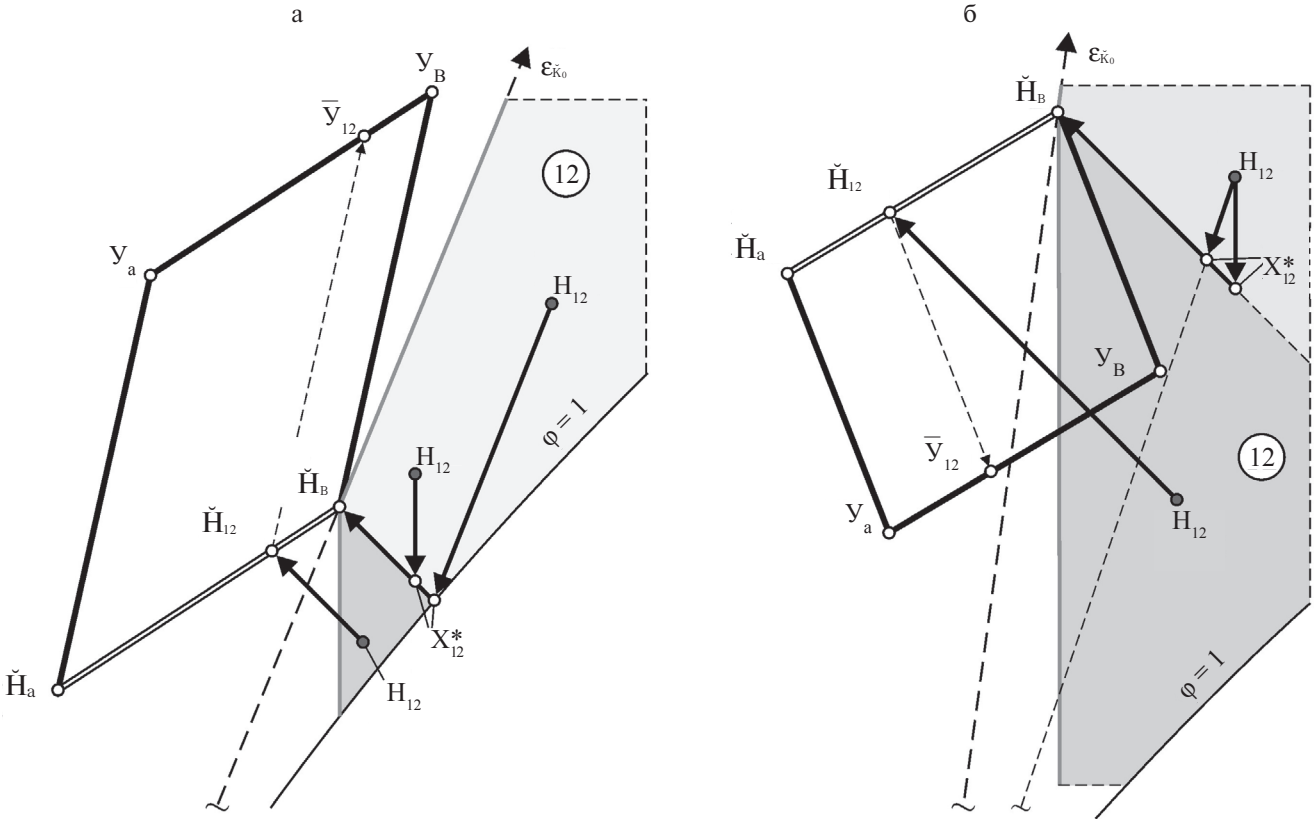

Рис. 2. Режимы функционирования адсорбционного воздухоосушителя при I (а) и IV (б) классах нагрузок в помещении для случая, когда $m_{\breve{Н}} = m_{\hat{Н}}$

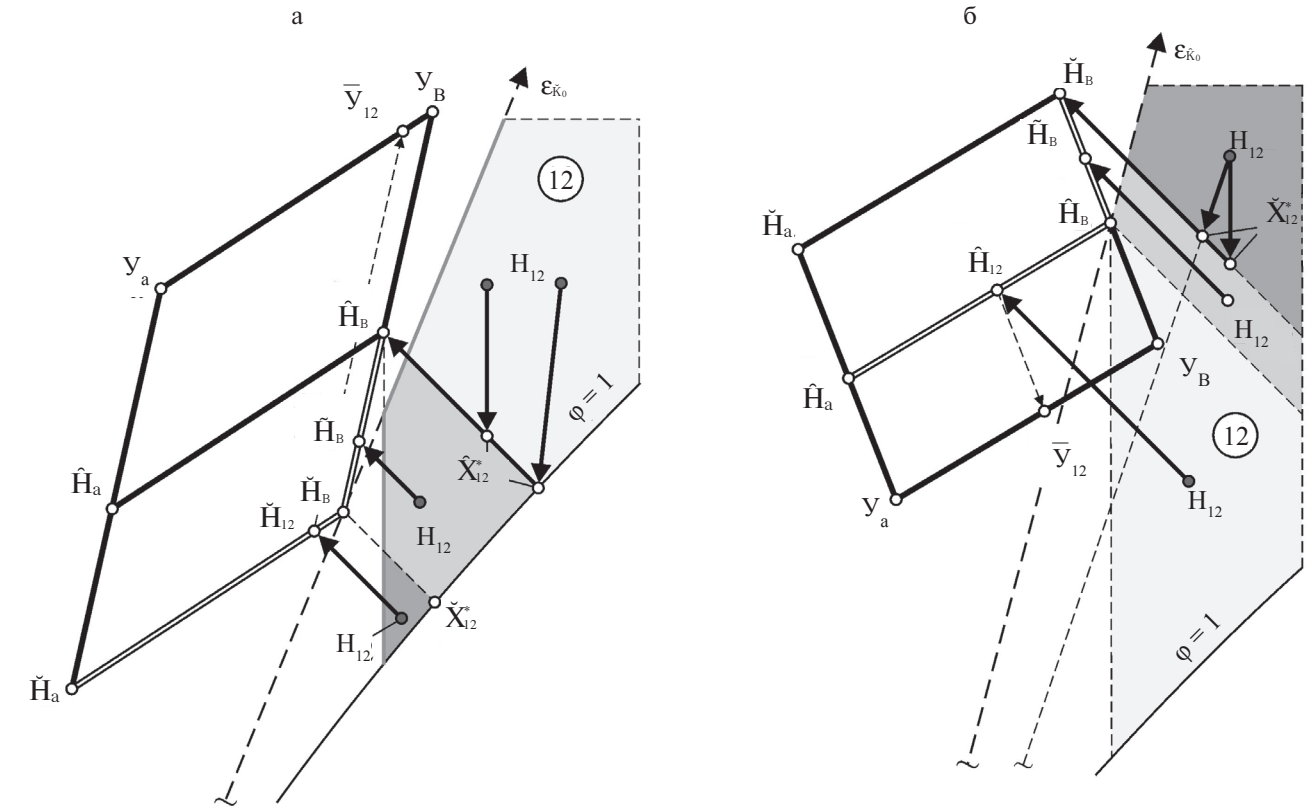

Рис. 3. Режимы функционирования адсорбционного воздухоосушителя при I (а) и IV (б) классах нагрузок в помещении для случая, когда при $m_{\breve{Н}} < m_{\tilde{Н}} < m_{\hat{Н}}$

показанного на рис. 2, б при $\varphi_{У_В}$=45%, когда опорная точка $\breve{Н}_В$ располагается левее изолинии $d_{К_0}$ = const и занимает такое положение на *I-d*-диаграмме, при котором в расчетной зоне 12 уже нельзя осушить воздух до требуемого значения влагосодержания $d_{\breve{Н}_В}$ только за счет традиционного процесса охлаждения, реализуемого в аппарате контактного (смесительного) типа. Использование же здесь теплообменного аппарата поверхностного типа (с рассолом

или непосредственного охлаждения) для более глубокого охлаждения воздуха (до точки росы, соответствующей изолинии $d_{\breve{Н}в} = \text{const}$) связано с большими перерасходами теплоты и холода, обусловленными взаимоисключающими процессами, о которых шла речь выше.

В нижней части расчетной зоны 12 (при $I_{Н_{12}} \le I_{\breve{X}_{12}^*}$) используется только адсорбционный способ осушки наружного воздуха, при котором реализуется вектор $Н_{12}\breve{Н}_{12}$, а в помещении поддерживаются параметры воздуха, соответствующие точке $У_{12}$. Точка $\breve{Н}_{12}$ является местом пересечения отрезка $\breve{Н}_а\breve{Н}_В$ и изоэнтальпы $I_{Н_{12}}$. Такая технология осушки воздуха в этой части расчетной зоны 12, при которой процесс не заканчивается на изолинии $d_{\breve{Н}в} = \text{const}$, а идет дальше, до точки $\breve{Н}_{12}$, позволяет исключить калорифер II подогрева.

При $m_{\breve{Н}} \ne m_{\hat{Н}}$ расчетная зона 12 делится изоэнтальпами $I_{\breve{X}_{12}^*}$ и $I_{\hat{X}_{12}^*}$ на три части (рис. 4). В верхней ее части (при $I_{Н_{12}} > I_{\hat{X}_{12}^*}$) используется комбинированный способ осушки при максимальном расходе наружного воздуха $m_{\hat{Н}}$: вектор процесса $Н_{12}\hat{X}_{12}^*$ реализуется конденсационным способом; вектор процесса $\hat{X}_{12}^*\hat{Н}_В$ — адсорбционным. В средней (при $I_{\hat{X}_{12}^*} \le I_{Н_{12}} < I_{\breve{X}_{12}^*}$) и нижней (при $I_{Н_{12}} \le I_{\breve{X}_{12}^*}$) частях расчетной зоны 12 используется только адсорбционный способ осушки, с той лишь разницей, что при реализации вектора $Н_{12}\tilde{Н}_В$ используется переменный расход наружного воздуха $m_{\tilde{Н}}$ ($m_{\breve{Н}} < m_{\tilde{Н}} < m_{\hat{Н}}$), а при реализации вектора $Н_{12}\breve{Н}_{12}$ — минимально-неизбежный $m_{\breve{Н}}$. Точка $\tilde{Н}_В$, в которой заканчивается вектор $Н_{12}\tilde{Н}_{12}$, является местом пересечения отрезка $\breve{Н}_В\hat{Н}_В$ и изоэнтальпы $I_{Н_{12}}$.

На рис. 2 и 3 отрезки $\breve{Н}_а\breve{Н}_В$ и $\breve{Н}_В\hat{Н}_В$, на которых располагаются точки, являющиеся концами векторов процессов адсорбционной осушки, выделены. Для остановки процесса осушки в этих точках последний должен быть управляемым. Для этого в качестве регулируемых параметров в общем случае могут выступать: влагосодержание воздуха на выходе из воздухоосушителя $d_Н^{ОС}$ и расходы воздуха через воздухоосушитель $m_Н^{ОС}$ и через байпас $m_Н^{б}$.

Удельный (на 1 м² площади) расход влаги, подлежащей удалению из воздуха в подсистеме адсорбционной осушки, равен

$$m_{W(-)} = m_Н^{ОС}(d_Н - d_Н^{ОС}),\ г/(с \cdot м^2),$$

где $d_Н$ — влагосодержание воздуха на входе в воздухоосушитель, г/кг.

Использование адсорбционных воздухоосушителей в СКВ оказывает неоднозначное влияние на капитальные и эксплуатационные затраты.

Влияние на капитальные затраты. С одной стороны, безусловно, требуется установка дополнительного оборудования. Но с другой стороны, появляется возможность, во-первых, отказаться от калорифера II подогрева и, во-вторых, уменьшить установочную производительность оборудования подсистемы холодоснабжения $d_Х^{уст}$ на величину $Dq_Х$ (последнее возможно в том случае, когда расчетная летняя точка наружного климата будет находиться в расчетной зоне 12).

Влияние на эксплуатационные затраты. Ликвидация перерасходов теплоты и холода позволит уменьшить переменную составляющую эксплуатационных затрат на $\Delta q_{Т(Х)}^{\Sigma}$. Но в тоже время добавляются затраты на регенерацию сорбента.

Таким образом, нельзя «слепо», без учета конкретных условий функционирования СКВ, тиражировать технические решения по СКВ, в которых используются адсорбционные воздухоосушители. Такие технические решения целесообразно применять только тогда, когда они экономически обоснованы.

Для этого в распоряжении разработчика должен быть инструмент в виде соответствующей методики, позволяющий на начальном этапе проектирования (когда формируется только облик будущей системы) определить, целесообразно ли для заданных условий функционирования СКВ использование воздухоосушителя адсорбционного типа.

Первая версия такой методики в виде блок-схемы показана на рис. 4.

В блоке *1* на основе исходных данных определяются координаты опорных точек ИТС. В блоке *2* определяется класс нагрузок в помещении. Если будет иметь место I или IV класс нагрузок, то выполняются процедуры, связанные с построением РТС (блок *3*), расчетом значений времени t_{12} и перерасходов теплоты и холода $\Delta q_{Т(Х)}^{\Sigma}$ (блок *4*). При этом задействуется специальная программа, для работы с которой потребуется информация о климате в том виде, как это было описано в работе [4]. Если значения перерасходов $\Delta q_{Т(Х)}^{\Sigma}$ окажутся существенными (блок *6*), то определяются режимы функционирования адсорбционного воздухоосушителя (блок *7*). Информация об этих режимах функционирования является исходной для выработки требований к подсистеме осушки воздуха и формировании исходных данных, необходимых для последующего расчета и подбора ее оборудования.

Если же условия в блоках *2* или *6* не выполняются, то использовать воздухоосушитель адсорбционного типа

Рис. 4. Блок-схема методики

в СКВ нецелесообразно.

При необходимости данная методика может быть доведена до компьютерной реализации.

Таким образом, в статье был рассмотрен лишь один из возможных способов повышения эффективности использования энергетических ресурсов, потребляемых в СКВ. Используя системный подход [1], нетрудно выявить целый комплекс подобных, неиспользуемых до сих пор, резервов для повышения эффективности процессов обработки воздуха и, в конечном итоге, улучшения количественных показателей, характеризующих качество СКВ. Каждый из таких резервов, в виду их важности, заслуживает самостоятельного рассмотрения.

Список литературы

1. *Рымкевич А. А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. — СПб.: АВОК С-З, 2003.
2. *Стефанов Е. В.* Вентиляция и кондиционирование воздуха. — СПб.: АВОК С-З, 2005.
3. *Сотников А. Г.* Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. В двух томах. Том 1. — СПб: AT-Publishing, 2005.
4. *Коченков Н. В., Кобышева Н. В., Клюева М. В.* Энергосберегающие режимы в СКВ и характеристика климата — взаимосвязанные задачи. // Инженерные системы. 2006. №3.