

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КВАЗИРЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СКВ

*Д.т.н., проф. А.Г. Сотников (СПбГУНиПТ)*

*ЗАО "ТермоТехнологии", С.-Петербург*

*директор по развитию А.В. Мальков*

*начальник технического отдела А.А. Болдырев*

*инженер М.С. Ивашко*

*Среди многочисленных технологических объектов кондиционирования есть отдельная группа помещений, где по условиям ассимиляции теплоты и влаги, обеспечения хорошей циркуляции воздуха и, кроме того, по требованиям чистоты и удаления микрофлоры отношение расходов  $L_n/L_{np}$  оказывается малым и круглогодично постоянным, а вся обработка воздуха происходит в одном кондиционере. К таким объектам можно отнести "чистые" помещения разных производств, некоторые объекты пищевой промышленности, архивы, фондохранилища, ЦОД (центры обработки данных), технологические склады различного сырья, готовой продукции и другие. Для таких объектов можно предложить несколько другой подход к оценке и построению круглогодично необходимых процессов обработки воздуха, а при переменных тепло- и влаговыделениях и луче процесса  $\varepsilon_{ном}$  - другой алгоритм функционирования. В силу достаточно позднего появления таких объектов на отечественном "рынке", рациональные решения к сожалению не описаны в известных книгах А.В. Нестеренко [1], Б.В. Баркалова и Е.Е. Карписа [2], А.А. Рымкевича [3, 4] и др. изданиях. В статье основное внимание уделено слабым местам применяемых решений и расчетов, что влияет на снижение надежности системы и качество работы ее аппаратов.*

Объекты кондиционирования и вентиляции весьма разнообразны, если судить и сравнивать их по комплексу исходных данных [3, 4]: внешним климатическим параметрам, параметрам воздуха, поддерживаемым в помещении, их диапазона и точности поддержания, тепловлаговыведениям, определяющих расход  $L_{пр.}$ , вредным веществам, их разбавлению до ПДК, удалению микрофлоры, выполнению саннормы, компенсацию воздуха, удаляемого местными отсосами, что в совокупности определяет минимально-допустимый расход наружного воздуха  $L_n$ . Дальнейшие обоснования относятся к тем объектам, в которых круглогодично отношение  $L_n/L_{пр.}$  мало (0,05-0,20) и постоянно. Будем, в отличие от замкнутых (рециркуляционных) СКВ, называть такие системы **квазирециркуляционными**. Термин "квази" означает "как бы", "как будто" или даже "почти". Такие системы и процессы в них требуют отдельного анализа, а пространство  $\square H$  (область наружных параметров, рис.1, а) – замены областью смеси  $\square C$ , обрабатываемой в кондиционере (рис. 1, а, б). Кроме того, постоянная рециркуляция не требует непрерывного управления клапанами наружного и рециркуляционного воздуха.

**Рассмотрим процессы тепловлажностной обработки воздуха** в такой системе (рис. 1, а, б), описанные в книге [5, т.1, гл.2]. Пусть тепловлаговыведения за какой-то период времени постоянны, что соответствует лучу  $\varepsilon_{пом.}$ . При заданном состоянии  $(\cdot)В$  ( $t_{в1}$ ,  $\varphi_{в}$ ) состояние приточного воздуха  $(\cdot)П$  ( $t_{пр}$ ,  $\varphi_{пр}$ ,  $d_{пр}$ ), а уходящего (рециркуляционного) -  $(\cdot)У$  ( $P$ ), в общем случае не совпадает с  $(\cdot)В$  на основе понятия о коэффициенте воздухообмена  $k_t = (t_y - t_{пр}) / (t_v - t_{пр})$  [6, 7]. Выберем на границе достаточно произвольно-очерченного  $t_n - \varphi_n$  комплекса несколько состояний ( $H_{рх}$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ , ...  $H_6$ ,  $H_7$  и  $H_8$  – см. рис. 1, а). Соединим эти точки поочередно с  $(\cdot)У$ , а отрезки разделим по заданному  $L_n/L_{пр.}$ , например 0,5 (рис. 1, а) или 0,2 (рис. 1, б). Поставленные точки смеси  $C_{н.р.}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , ...  $C_6$ ,

$C_7$  и  $C_8$ , соединенные кривой (рис. 1, а, б) образуют новую границу области смеси ( $\square C$ ). Дальнейший анализ будем производить для состояний в этой области (забудем тем самым о исходном состоянии наружного воздуха).

Дальнейшие построения производим для  $(\cdot)П$ , пренебрегая для простоты понимания некоторым нагревом приточного воздуха в вентиляторе и двигателе:  $\Delta t_{пр} = 0,8 P_{вент}/(\eta_{вент}\eta_{дв})$ , где  $P_{вент}$  – полное давление вентилятора (кПа). Предполагая изохальное увлажнение (водой), через  $(\cdot)П$  проводим линии  $i_{пр} = const$  и  $d_{пр} = const$ , которые разделяют область смеси  $\square C$  на три зоны (режимы 1, 2, 3), где требуются разные процессы тепловлажностной обработки (см. рис. 1, а, б).

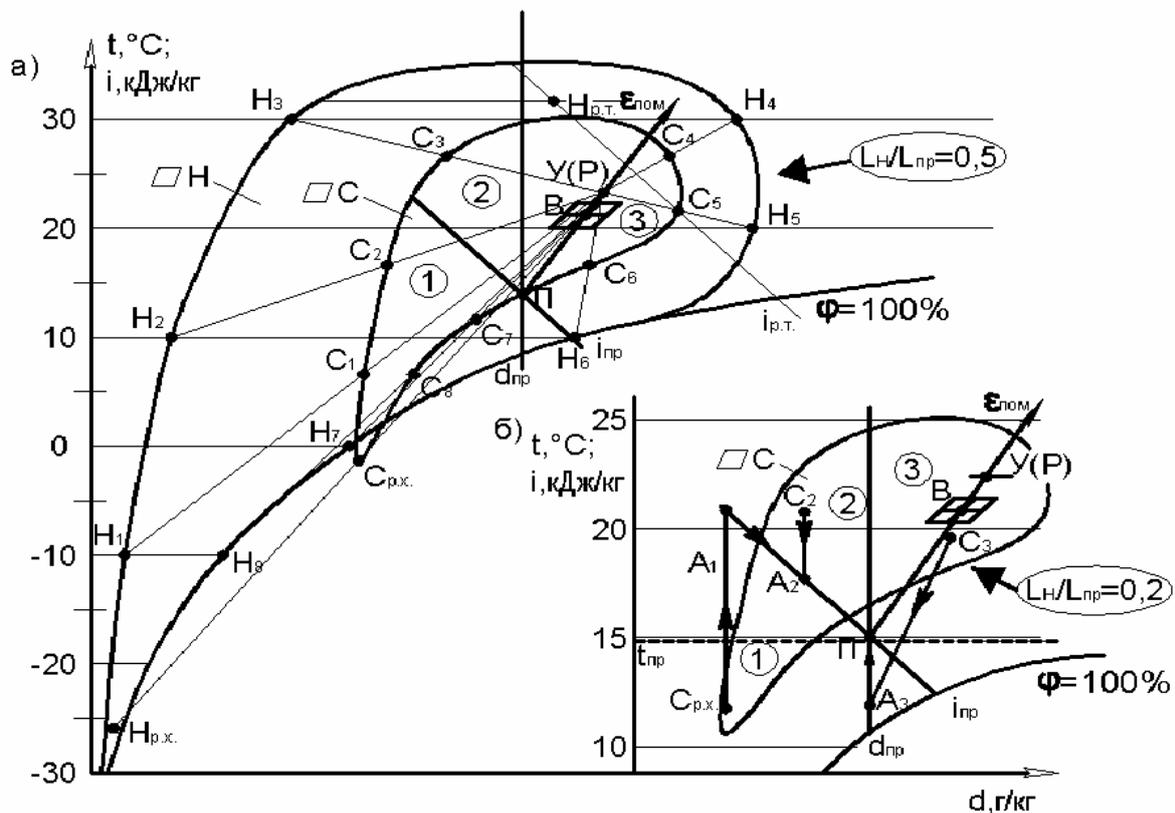


Рис. 1

**Рис. 1.** Методика графической трансформации области наружных параметров ( $t_n$ -  $\phi_n$  комплекс)  $\square H$  в область смеси ( $t_c$ -  $\phi_c$  комплекс)  $\square C$  и процессов тепловлажностной обработки смеси в технологической СКВ с изохальным увлажнением при произвольном луче процесса  $\epsilon_{пом} = -\infty \dots +\infty$ : **1** – режим с нагреванием и увлажнением смеси; **2** – режим с охлаждением (без осушения) и увлажнением смеси; **3**

– режим с осушением-охлаждением и нагреванием смеси; **а** – при  $L_n/L_{np}=0,50$  в «обычном» масштабе; **б** - при  $L_n/L_{np}=0,2$  в увеличенном масштабе; изотерма  $t_{пр}$  соответствует границе режимов нагревания-охлаждения при паровом (изотермическом) увлажнении воздуха;

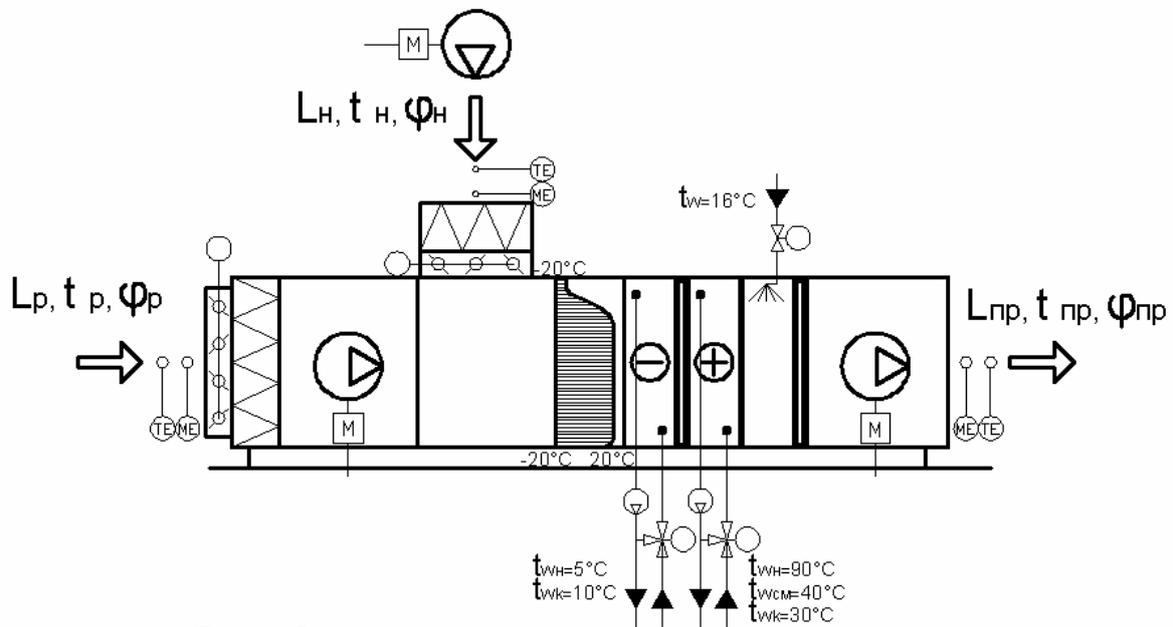


Рис. 2

**Рис. 2.** Вид – технологическая схема кондиционера с аппаратами для тепловлажностной обработки воздуха в последовательности, соответствующей круглогодичным процессам на рис. 1: эпюра температур после смешения при обычном расположении воздушных клапанов показана при  $L_n/L_{np}=0,1$ ,  $t_p=20^0C$ ,  $t_n=-20^0C$ .

**Технологическая схема кондиционера,** соответствующая построенным на рис. 1, б процессам тепловлажностной обработки в трех круглогодично наблюдаемых режимах работы такой СКВ показана на рис. 2. Изменение тепло- и влаговыделений в объекте в течение года и луча процесса  $\epsilon_{пом.}$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  не меняет технологическую схему такого кондиционера, но уточняет особенности выбора отдельных аппаратов при максимальной нагрузке на каждый. Например, воздухонагреватель и расчетный расход теплоносителя определяют при  $Q_{min}$ , воздухоохладитель – при  $Q_{max}$ , осушитель – при  $G_{вл.мах}$ , увлажнитель – при  $G_{вл.мин}$ .

В последовательности перемещения воздуха в кондиционере после воздушных клапанов и фильтров для очистки наружного и рециркуляционного воздуха расположены следующие аппараты с узлами обвязки и управления: воздухоохладитель (он же при необходимости осушитель воздуха), воздухонагреватель и увлажнитель (рис. 2), а далее вентиляторная установка (вентилятор, электродвигатель, устройство управления), шумоглушитель (на рис. 2 не показан). В такой установке в зависимости от текущей тепловлажностной нагрузки помещения ( $Q_{\text{явн.}}$ ,  $G_{\text{вл.}}$ ), состояния внутреннего (В), уходящего (У), иначе рециркуляционного воздуха (Р), приточного ( $\Pi_i$ ) и текущего состояния наружного воздуха ( $H_i$ ). а значит смеси (С) с параметром  $x(t, d, i)$ :

$$x_c = (L_n/L_{\text{пр}})x_n + (1 - L_n/L_{\text{пр}})x_p \quad (1)$$

можно выполнять все требуемые процессы его обработки. Например, при  $d_c < d_n$  требуется охлаждение или нагревание, но сопровождаемое увлажнением, а при  $d_c > d_n$  – осушение, сопровождаемое охлаждением и последующее нагревание. Подобные технологические схемы известны [2, 3, 4, 5 и др.] и традиционно применяются в центральных СКВ с постоянной или переменной рециркуляцией. Для дальнейшего анализа запишем уравнение для границы между режимами нагревания и охлаждения, зависящей от параметров ( $t_p, i_p$ ), текущей нагрузки помещения ( $Q_{\text{явн.}}$ ,  $G_{\text{вл.}}$ ) и соотношения  $L_n/L_{\text{пр}}$ . При использовании парового увлажнения граничная температура определяется по зависимости:

$$t_{\text{н.гран}} = t_p - (L_n/L_{\text{пр}})^{-1} (Q_{\text{явн.}}/c_v \rho_v L_{\text{пр}}) \quad (2)$$

а при использовании водяного увлажнителя справедливо:

$$i_{н.гран} = i_p - (L_n/L_{пр})^{-1} (Q_{явн} + G_{вл} i_n) / (\rho_v L_{пр}) \quad (3)$$

Например, при  $t_p = 20^\circ\text{C}$ ,  $\phi_p = 53\%$ ,  $i_p = 45$  кДж/кг,  $L_n/L_{пр} = 0,10$  и комплексе  $(Q_{явн} + G_{вл} i_n) / (\rho_v L_{пр}) = i_p - i_{пр} = 6$  кДж/кг текущая граничная энтальпия по уравнению (3) составит  $i_{н.гран} = 45 - 0,1 \cdot 6 = -15$  кДж/кг, то есть придется на холодный период года и сугубо отрицательные температуры наружного воздуха. Может оказаться так, что в течение суток в ночные часы при  $i_n < i_{н.гран} = -15$  кДж/кг будет работать воздухонагреватель, а в дневные часы при  $i_n > i_{н.гран} = -15$  кДж/кг – воздухоохладитель. Впрочем, это зависит в сильной мере еще и от текущих тепло- ( $Q_{явн}$ ) и влаговыделений ( $G_{вл}$ ) помещения, которые есть сумма отдельных слагаемых и обычно меняются.

**Рассмотрим далее, все ли так просто в описываемой технологической схеме и какие "подводные камни" она в себе содержит.** Одна из причин инженерных ошибок – весьма упрощенное представление о таких сложных в термодинамическом отношении процессах, как управляемое разными способами осушение-охлаждение (во имя осушения) и управляемое смешение наружного и рециркуляционного воздуха. В первом случае не учитывают особенность процесса – перед осушением воздух охлаждается и разные способы управления (температурой и расходом хладоносителя, циклической подачи хладона, байпасировании аппарата воздухом) см. [5, 8 и др.]. Во втором случае пренебрегают отсутствием перемешивания потоков с разными температурами ( $t_p$ ,  $t_{ни}$ ) воздуха через охладитель или нагреватель (см. эпюру на рис.2).

Оценим, к каким последствиям в работе этих аппаратов приведет указанное расслоение температур. Для воздухонагревателя такой СКВ при малом  $L_n/L_{пр}$  расчетный нагрев  $\Delta t = t_{пр} - t_c$  обычно очень небольшой ( $\sim 5 \dots 10$   $^\circ\text{C}$ ), аппарат должен быть малой рядности, а процесс рассчитан при  $t_{w.см} = 35-50$   $^\circ\text{C}$ , существенно ниже, чем расчетная температура воды  $t_{w.н.р}$

источника теплоты (ТЭЦ, котельная). Бóльшую часть времени такой аппарат будет работать с малым расходом сетевой воды  $G_w$ , а плунжер трехходового клапана будет находиться вблизи закрытия, что приведет к автоколебаниям, закрытию клапана и многократному срабатыванию защиты от замерзания воды. Чтобы избежать этих явлений требуется ввести изменение в схему обвязки аппарата. Традиционное размещение датчиков защиты по воздуху и воде не учитывает ни неравномерности температур воздуха, ни различия температур воды в разных частях аппарата, а при нагреве воздуха с  $t_p=22^{\circ}\text{C}$  и  $t_n=t_{\text{нрх}}=-26^{\circ}\text{C}$ , особенно трудно реализовать измерение  $t_{wк}$  в так называемой «опасной» трубке.

Свои особенности имеет реализация процесса осушения-охлаждения. В зависимости от  $d_{\text{пр.мин}}$  может потребоваться разный хладоноситель – вода или раствор этиленгликоля в воде. Последнее предпочтительно, так как «застраховует» первый по ходу воздуха аппарат от возможного замерзания воды при отрицательной наружной температуре  $t_n$ . В режиме охлаждения смеси  $t_c=19,5^{\circ}\text{C}$ , в случае, если  $t_p=22^{\circ}\text{C}$ ,  $t_n=-5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w.н}=5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w.к}=10^{\circ}\text{C}$ , на (большой) части поверхности произойдет ожидаемое охлаждение, однако при этом на меньшей наоборот будет нежелательный нагрев. Такая одновременность противоположных процессов требует учета по специальной методике и компенсации ненужного нагрева «лишним» холодом.

**Подводя итог этому перечислению, обратим внимание читателя, проектирующего подобные системы, на сложность протекающих процессов и возможные неэффективные решения, которые позволят избежать накопленный нами опыт в проектировании (см. далее пример).**

**Алгоритм функционирования такой СКВ** обеспечивает заданную последовательность работы аппаратов в трех вышеупомянутых режимах.

Поддержание технологически заданных параметров может производиться в нескольких вариантах:

1. Если тепло- и влаговыделения в помещении постоянны, то можно применять решения по схеме [5, т. I, рис. 2.41-2.42].
2. Если в тех же условиях ( $Q_{\text{явн}} \approx \text{const}$ ,  $G_{\text{вл}} \approx \text{const}$ ) объект инерционен за счет запаздывания к постоянной времени между сечениями, где измеряют параметры  $V(t_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}})$  или  $P(t_{\text{р}}, \varphi_{\text{р}})$  и на притоке  $\Pi(t_{\text{пр}}, \varphi_{\text{пр}})$ , то применяют известное каскадно-связанное регулирование [3, 8 и др.].
3. Если в объекте переменные теплопритоки, влагопритоки и влагопотери, лучше всего применить комбинированное управление по нагрузке и параметру в помещении в течение максимально возможных 12 режимов [3, 8], названное алгоритмом оптимального управления, но в модификации реализации 3 режимов обработки смеси. Основные датчики ( $t$ ,  $t_{\text{м}}$  или  $t$ ,  $\varphi$ ) и места их размещения, кроме рабочей зоны ( $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{в.м}}$  или  $t_{\text{в}}$ ,  $\varphi_{\text{в}}$ ) показаны на рис. 2. Во всех вариантах управления требуется предусмотреть переключение воздухоохладителя с режима управляемого охлаждения (при  $d_{\text{с}} < d_{\text{п}}$ ) на режим управляемого тем или иным способом [5, т. I, гл.6] осушения, сопровождаемого охлаждением, а при избыточности последнего компенсируемого последующим нагреванием. Надо иметь в виду, что построение процесса охлаждения-осушения по правилу смеси можно реализовать только в схеме с байпасированием – управляемым обводом воздуха, что не предусматривают конструкции кондиционеров и поэтому надо принимать специальные решения. Ниже описан пример современной реализации технических решений подобной СКВ с некоторыми изменениями по отношению к схеме рис. 2 на одном из объектов.



**Объектом, для которого выполняли работы по проектированию и монтажу системы кондиционирования воздуха (февраль-июнь 2009 г.), явился склад нетабачных материалов**

(далее - НТМ буфер) одной из табачных фабрик Санкт-Петербурга, где материалы (бумага, картон) выдерживаются перед подачей на производство. Площадь помещения 2420 м<sup>2</sup> (71×34 м), а его высота 11 м. Высота стеллажей, а значит и высота рабочей зоны данного помещения, загруженной материалом, равна 9 м. Свободная площадь помещения составляет 1690 м<sup>2</sup> (70% от общей площади). Материалы складированы на стеллажах длиной – 25,2 м, шириной – 2,4 м; расстоянием между стеллажами – 2 м. Объект окружен помещениями с близкими по значению, постоянно поддерживаемыми температурно-влажностными параметрами. Помещение также характеризуется небольшими по значению удельными теплопоступлениями от освещения, электропогрузчиков и через кровлю. Влагодоступления и потери влаги в помещении непостоянны и зависят от количества и влажностных параметров складированных материалов, времени года, способа транспортировки от производителя. Поэтому при отсутствии точных данных пришлось отчасти прибегнуть к **эвристическому проектированию** (проектирование при отсутствии точных исходных данных о тепловлажностных нагрузках объекта).

В соответствии с техническим заданием в помещении необходимо круглогодично и круглосуточно (100% резервирование, в соответствии с

п.7.2.3 [9]) обеспечивать следующие климатические условия: температура –  $22 \pm 1$  °С и относительная влажность –  $58 \pm 5\%$ .

Для реализации задачи, поставленной из условия поддержания заданных параметров и обеспечения подачи циркуляционного воздуха в зону складированного материала, предусмотрена система



кондиционирования воздуха с постоянным расходом приточного воздуха (CAV), принятому по условию обеспечения хорошей циркуляции воздуха для складов бумаги и книгохранилищ [5].

Кратность воздухообмена в помещении равна:  $k_{p,нетто}=1,5$  ч<sup>-1</sup> и  $k_{p,брутто}=2,0$  ч<sup>-1</sup>, а расход приточного воздуха численно составил  $L_{пр}=40000$  м<sup>3</sup>/ч. Наружный воздух подается в количестве, необходимом для удаления внутренней микрофлоры (10% от общего расхода воздуха). Система кондиционирования воздуха состоит из



2-х центральными кондиционерами (основного и резервного), система автоматизации обеспечивает равную выработку мото-ресурса каждым кондиционером.

Центральный кондиционер включает в

себя два вентилятора: рециркуляционный и приточный, забирающий наружный воздух. Рециркуляционный вентилятор обеспечивает транспортировку воздуха от вытяжных устройств до входа в приточную часть кондиционера, а приточный вентилятор рассчитан на перемещение воздуха в остальной (приточной) части системы.

Принципиальная схема центрального кондиционера принята в соответствии с рис. 2, но с некоторыми изменениями, что позволило полностью исключить расслоение температур перед аппаратами и возможность замерзания тепло- и хладоносителя в теплообменниках в холодный период года, а значит отказаться от соответствующей защиты. Система автоматизации предполагает управление по оптимальным режимам при переменных тепло- и влаговыделениях и стабилизацию температуры и влажности по каскадно-связанной схеме, что вызвано большим транспортным запаздыванием объекта, прежде всего в проходах между стеллажами  $\tau_0 = l_{\text{прох}} / v_{\text{в.ср}} = 25,2 / 0,15 = 165 \text{ с.}$  (ок. 3 мин.).

Схема воздухораспределения применена с учётом технологических особенностей объекта и размещения стеллажей. Число приточных решеток равно удвоенному числу проходов, они расположены у противоположных стен помещения на разной высоте. Приточный воздух подаётся направленными плоскими вертикальными струями (рис. 3) через решетки



АРС 1000x200 в проходы между стеллажами с двух сторон на двух уровнях. Таким образом, эти проходы служат естественными каналами для движения воздуха, что обеспечивает надежную циркуляцию воздуха в пространстве между стеллажами. Вытяжные решётки равномерно распределены по длине склада в центральной верхней части помещения. Расчёт и подбор типа приточных решеток «Арктос» [10] производили на условие, чтобы плоская струя попала в проход (рис. 3).

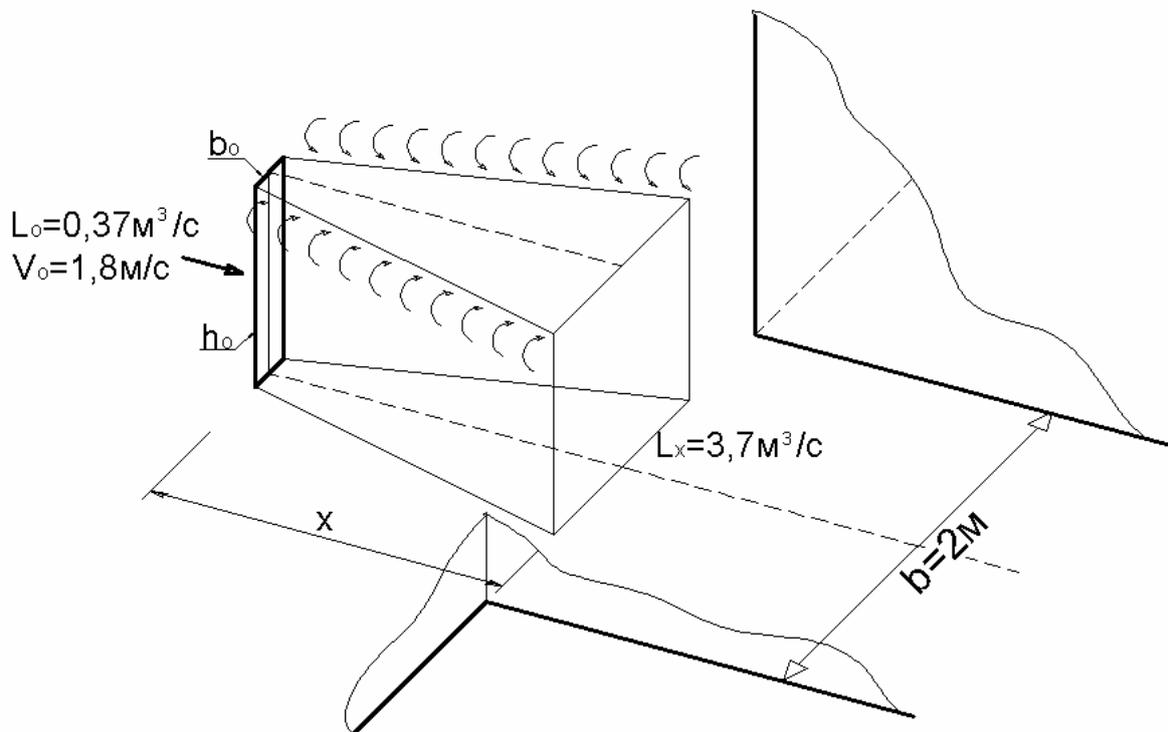


Рис. 3

Рис. 3. Схема подачи плоской приточной струи в проход между стеллажами цеха и основные геометрические характеристики.

Проведенные испытания и запуск системы подтвердили её работоспособность и правильность технических решений, однако необходима круглогодичная проверка работы установок с учетом текущих влаговывделений и влагопотерь от пачек бумаги.

Авторы этой статьи при необходимости поделятся с Вами особенностями проектирования подобных систем для конкретного объекта:

Д.т.н., проф. А.Г. Сотников (СПбГУНиПТ) [asotnikov2005@yandex.ru](mailto:asotnikov2005@yandex.ru)  
ЗАО "ТермоТехнологии", С.-Петербург, тел./факс 8-(812)-326-24-16;  
[www.thermo.spb.ru](http://www.thermo.spb.ru), директор по развитию А.В. Мальков [amalkov@thermo.spb.ru](mailto:amalkov@thermo.spb.ru),  
начальник технического отдела А.А. Болдырев [aboldyrev@thermo.spb.ru](mailto:aboldyrev@thermo.spb.ru), инженер М.С.  
Ивашко [m.ivashko@thermo.spb.ru](mailto:m.ivashko@thermo.spb.ru)

#### Литература:

1. А.В. Нестеренко. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. / Уч. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1962. – 355 с.
2. Б.В. Баркалов, Е.Е. Карпис. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. - М.: Стройиздат, 1971. – 269 с.; изд. 2-ое, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 312 с.
3. А.А. Рымкевич, М.Б. Халамейзер. Управление системами кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение, 1977. – 214 с.
4. А.А.Рымкевич. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1990. – 300 с.; Изд.2-ое, С-Пб.: АВОК-СЗ, 2003. – 300 с.
5. А.Г. Сотников. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Т. I, С-Пб, АТ-Publisching, 2005, - 508 с.; т. II, ч.1, С-Пб, АТ-Publisching, 2006. – 416 с.; т. II, ч. 2, С-Пб, АТ-Publisching, 2007. – 520 с.
6. М.И. Гримитлин. Распределение воздуха в помещениях. М.: Стройиздат, 1982. – 164 с.; изд. 2-ое, С-Пб, 1994. – 316 с.; изд. 3-е, доп. и испр., С-Пб: АВОК-СЗ, 2004. – 320 с.
7. Г.М. Позин. Определение количества приточного воздуха для производственных помещений с механической вентиляцией. / Методические рекомендации. – Л.: ВНИИОТ, 1983. – 57 с.

8. А.Г. Сотников. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. – Л.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
9. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция, кондиционирование.
10. Воздухораспределители компании «Арктос»./ Указания по расчёту и практическому применению, изд. 5-ое, СПб.; 2008. - 215 с.