

Энергосберегающие местно-центральные системы кондиционирования воздуха

Начиная с 1962 года в многокомнатных административных зданиях в нашей стране началось применение местно-центрального СКВ. По периметру зданий в служебных помещениях, под окнами, устанавливали местные эжекционные кондиционеры моделей КНЭ-У [1]. Помещения с КНЭ-У имели длину от окна до внутренней стены не более 6 м. Натурные испытания показали надёжность поддержания температур воздуха по такой длине рабочей зоны.

Автор: О.Я. КОКОРИН, д.т.н., профессор МГСУ, научно-технический консультант ООО «ЛЭС»; М.В. БАЛМАЗОВ, к.с.н., член-корреспондент РАЕН, генеральный директор ООО «ЛЭС»; С.В. НАБЕРЕЖНЕВ, главный инженер проекта ООО «ЛЭС»

Особенности применения и преимущества местно-центральных систем кондиционирования воздуха (СКВ) были изложены в работах [1-3]. Выделение влаги в воздух в служебных помещениях в административных зданиях наблюдалось только от людей и воспринималось санитарной нормой приточного наружного воздуха, подаваемого к соплам КНЭ-У от центральных кондиционеров. Центральные кондиционеры были собраны из секций, которые в те годы производились Харьковским котлорadiatorным заводом (будущим заводом «Кондиционер»).

Для очистки наружного приточного воздуха применялись масляные самоочищающиеся фильтры. В административных зданиях на Новом Арбате СКВ с КНЭ-У работает с 1968 года. В процессе длительной эксплуатации установлено, что масло с поверхности сетки фильтров испарялось. Это привело к осаждению испарившегося масла на стенках приточных воздухопроводов и соплах КНЭ-У. В 1996 году служба эксплуатации СКВ в административных зданиях приняла решение заменить доводчики КНЭ-У, так как в помещениях стал слышен шум при выходе приточного наружного воздуха из сопел. Проведённые замеры показали, что скорость выхода воздуха из сопел увеличилась до 18 м/с, что и вызывало шум. Бесшумная работа КНЭ-У обеспечивается при скоростях воздуха на выходе из сопел не выше 14 м/с. Было предложено прочистить сопла, что обеспечивало устранение загрязнений их выходных отверстий, и шумы от работы КНЭ-У прекратились. Реконструкция СКВ в этих зданиях коснулась только замены центральных кондиционеров и холодильных машин на современные аналоги [2].

Начиная с 1962 года непрерывно проводятся работы по совершенствованию местно-центральных СКВ с эжекционными доводчиками (ДЭ). В современных многокомнатных зданиях длина рабочей зоны может быть более 6 м, что требует применения дополнительных местных кондиционеров. Анализ результатов лабораторных и натурных исследований позволило создать оригинальную отечественную конструкцию эжекционного кондиционера ДЭ, который получил индексацию «энергосберегающий прибор отопления кондиционирования» — ЭПОК-180/60 [3] (рис. 3). Рекомендуемая производительность доводчика по приточному наружному воздуху при двухрядном расположении сопел с $d_c = 6$ мм составляет 180 м³/ч, при однорядном расположении сопел — 60 м³/ч [3].



О. Я. КОКОРИНУ — 90!

Нашему уважаемому автору, д.т.н., профессору МГСУ Кокорину Олегу Яновичу 25 ноября исполняется 90 лет. От лица редакции и читателей искренне поздравляем юбиляра!

Отличительными конструктивными особенностями ЭПОК-180/60 являются: забор эжектируемого внутреннего воздуха с поверхности остекления окна, под которым установлен ДЭ; подача приточного воздуха в рабочую зону обслуживаемого помещения со скоростью не более 0,5 м/с. При применении ЭПОК-180/60 длина обслуживаемой рабочей зоны помещения может достигнуть 15 м. Проектирование СКВ с применением ЭПОК необходимо начинать с анализа условий формирования теплового режима в обслуживаемых помещениях в холодный и тёплый периоды года.

Пример: в служебном помещении площадью 30,6 м² (3,4×9 м) работает три сотрудника, рабочие места которых имеют современное оборудование, потребляющее 150 Вт/ч электроэнергии. Общие выделения в тёплый период года от людей и служебного оборудования при $t_b = 25$ °C составляют, по явному теплу:

$$q_{т.я} = q_{я.л} + q_{об} = 3 \times 70 + 3 \times 150 = 660 \text{ Вт/ч, а по влаге:}$$

$$W_{вл} = w_{вл.л} L = 180 \times 3 = 540 \text{ г/ч.}$$

По рекомендации АВОК [4] в служебные помещения санитарная норма приточного наружного воздуха составляет 60 м³/ч на одного человека. Для рассматриваемого помещения:

$$L_{пн} = 60 \times 3 = 180 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

В тёплый период года в рабочей зоне от работы СКВ обеспечиваются комфортные параметры воздуха: $t_b = 25$ –23°С, $L_b = 60$ –40% и $d_b = 12,1$ г/кг. Влаго содержание приточного наружного воздуха [г/кг] вычисляется по формуле:

$$d_{пн} = d_y - \frac{W_{вл}}{l_{пн} \rho_{пн}}, \quad (1)$$

где d_y — влагосодержание удаляемого из помещения воздуха, г/кг.

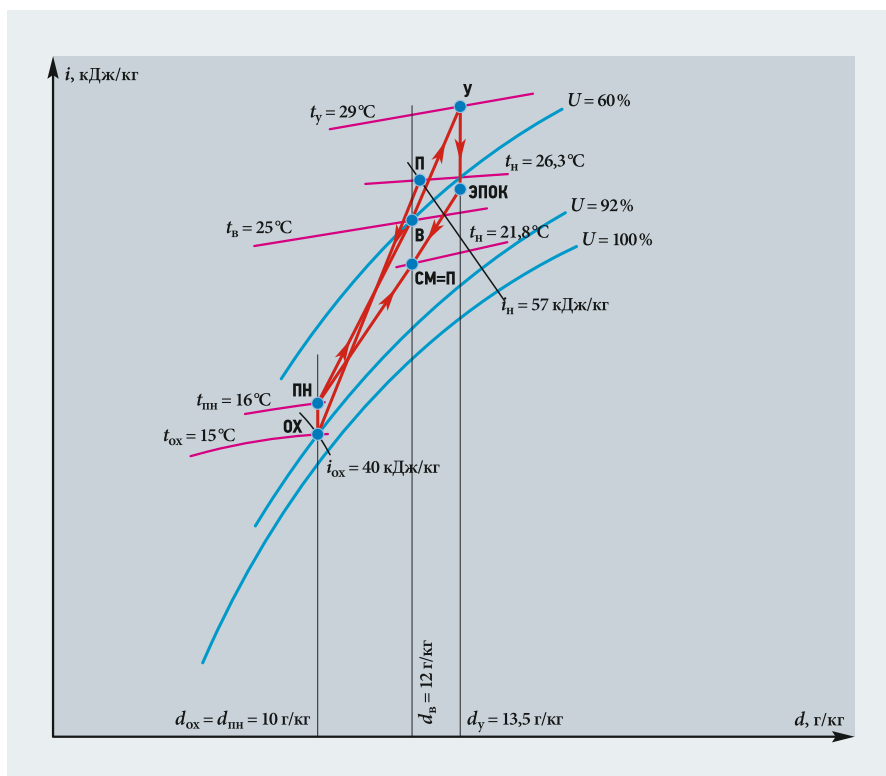


Рис. 1. Построение на i - d -диаграмме влажного воздуха расчётного режима работы местной центральной СКВ в тёплый период года в климате Москвы (**Нн-ОХ** — охлаждение и осушение приточного наружного воздуха в центральном приточном агрегате; **ОХ-Пн** — нагрев в приточном агрегате и воздуховодах; **Пп-В-У** — поглощение теплом влаговывделений охлаждённого и осушенного приточного наружного воздуха; **У-ЭПОК** — охлаждение в теплообменнике ЭПОК-180 эжектируемого воздуха с поверхности стекла в окне; **ЭПОК-СМ-Пн** — смешение в ЭПОК-180; **СМ-В-У** — поглощение тепла и влаговывделений приточным от ЭПОК-180 воздухом)

Изменение влагосодержания воздуха в обслуживаемом СКВ помещении в работах [2, 3] предложено оценивать через показатель вида:

$$K_{\text{Id}} = \frac{d_y - d_{\text{пн}}}{d_{\text{в}} - d_{\text{пн}}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{пн}}$ — влагосодержание приточного от ЭПОК воздуха, г/кг.

Изменение температуры в помещении оценивается через показатель вида:

$$K_{\text{It}} = \frac{t_y - t_{\text{пн}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{пн}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{пн}}$ — температура приточного от ЭПОК воздуха, °С.

Для создания комфортных условий при подаче приточного воздуха в рабочую зону величина перепада температур ($t_{\text{в}} - t_{\text{пн}}$) не должна быть более 5 °С [4].

В доводчике ЭПОК-180 коэффициент эжекции внутреннего воздуха через оребренную поверхность встроенного теплообменника, по трубкам которого в тёплый период года проходит холодная вода, равен $K_{\text{эж}} = l_{\text{пн,эж}}/l_{\text{пн}} = 3$.

С использованием показателя $K_{\text{эж}}$ количество эжектируемого воздуха через теплообменник ЭПОК-180 составляет:

$$l_{\text{в,эж}} = K_{\text{эж}} l_{\text{пн}} = 3 \times 180 = 540 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество приточного воздуха в помещениях от ЭПОК-180 равно:

$$l_{\text{п}} = l_{\text{в,эж}} + l_{\text{пн}} = 540 + 180 = 720 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Натурные испытания показали, что в офисных помещениях при выделении влаги только от людей соотношение количества поглощаемых влаговывделений в рабочей зоне помещения к общим влаговывделениям составляет около 0,46. С использованием графика на рис. 1.1 (стр. 6 [2]) находим $K_{\text{Id}} = 2,1$.

Количество влаги, поглощаемой в рабочей зоне, будет равно:

$$W_{\text{вл,р.з}} = 0,46 W_{\text{вл}} = 540 \times 0,46 = 249 \text{ г/ч}.$$

Влагосодержание приточного воздуха от ЭПОК-180 должно быть:

$$d_{\text{пн}} = d_{\text{в}} - \frac{W_{\text{вл,р.з}}}{l_{\text{п}} p_{\text{п}}} = 12,1 - \frac{249}{720 \times 1,2} = 11,8 \text{ г/кг}.$$

Влагосодержание удалённого воздуха при $K_{\text{Id}} = 2,1$: $d_y = d_{\text{пн}} + K_{\text{Id}}(d_{\text{в}} - d_{\text{пн}}) = 11,8 + 2,1 \times (12,1 - 11,8) = 12,4 \text{ г/кг}$.

Все влаговывделения в СКВ с ЭПОК воспринимаются только $l_{\text{пн}}$. Для рассматриваемого помещения получим:

$$d_{\text{пн}} = d_y - \frac{W_{\text{вл}}}{l_{\text{пн}} p_{\text{пн}}} = 12,4 - \frac{540}{180 \times 1,22} = 10 \text{ г/кг}.$$

В центральном кондиционере пригтовлена только санитарная норма приточного наружного воздуха $L_{\text{пн}}$ [м³/ч] из расчёта на количество человек L , работающих в обслуживаемых помещениях: $L_{\text{пн}} = L \times 60 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для расчётных параметров тёплого периода года в климате Москвы по но-

В современных многокомнатных зданиях длина рабочей зоны может быть более 6 м, что требует применения дополнительных местных кондиционеров. Анализ результатов лабораторных и натурных исследований позволило создать оригинальную эжекционный кондиционера ДЭ

вым климатическим нормам расчётная энтальпия наружного воздуха равна $i_{\text{н}} = 57 \text{ кДж/кг}$. Начальная относительная влажность наружного воздуха менее 70 %, что позволяет в поверхностном теплообменнике охладить и осушить наружный воздух до $L_{\text{оx}} = 92 \%$ [2]. На i - d -диаграмме (рис. 1) в месте пересечения $d_{\text{оx}} = d_{\text{пн}} = 10 \text{ г/кг}$ и $L_{\text{оx}} = 92 \%$ получим: $i_{\text{оx}} = 40 \text{ кДж/кг}$ и $t_{\text{оx}} = 15 \text{ °С}$. Для рассматриваемого помещения расход холода на охлаждение $l_{\text{пн}} = 180 \text{ м}^3/\text{ч}$ составляет следующую величину:

$$Q_{\text{х,пн}} = \frac{180 \times 1,22 \times (57 - 40)}{3,6} = 1037 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

В климате Москвы в холодный период года расчётная температура наружного воздуха равна $t_{\text{вн}} = -28 \text{ °С}$. В центральном приточном агрегате в две ступени (в установке утилизации с насосом циркуляции антифриза и в воздушном тепловом насосе) приточный наружный воздух нагревается до температуры $t_{\text{пнх}} = +8 \text{ °С}$. Эжектируемый воздух в ЭПОК поступает с поверхности холодного остекления и имеет температуру, близкую к $t_{\text{эж}} = 21 \text{ °С}$. В теплообменнике ЭПОК эжектируемый воздух нагревается до температуры порядка 23–30 °С. При смешении в ЭПОК можно получить температуру выше $t_{\text{вх}} = 20 \text{ °С}$ и компенсировать теплопотери.

На эжекцию к поверхности стекла поступает воздух из верхней зоны помещения, имеющий температуру не ниже $t_{\text{в,зон}} = 23 \text{ °С}$. Проходя по поверхности холодного остекления, эжектируемый из верхней зоны помещения воздух охлаждается до температуры порядка 21 °С. В помещении с ЭПОК-180 это обеспечит отдачу тепла к холодному остеклению:

$$q_{\text{т,ос}} = L_{\text{эж}} p (t_{\text{вх}} - t_{\text{нх}}) = 540 \times 1,22 \times 1,0 \times (23 - 21) = 366 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Поверхность остекления составляет $S_{\text{ос}} = 6 \text{ м}^2$ и $R_{\text{ос}} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$. Расчётные теплопотери через остекление:

$$q_{\text{т,ос}} = \frac{S_{\text{ос}}(t_{\text{вх}} - t_{\text{нх}})}{R_{\text{ос}}} = \frac{6 \times (20 + 28)}{0,6} = 480 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Теплопотери через остекление при применении ЭПОК-180 снижаются:

$$q_{т.ос.ЭПОК} = 480 - 366 = 144 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Теплопотери через наружную стену с поверхностью 4,2 м² при R_{ст} = 3,1 составляют величину:

$$q_{т.ос} = \frac{4,2 \times (20 + 28)}{3,1} = 65 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Общие расчётные теплопотери через стену и окно при применении ЭПОК-180 в офисном помещении:

$$q_{т.пот} = 144 + 65 = 179 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

В холодный период года теплопритоки в рабочие часы поступают от офисного оборудования (до 40% N_{об}) плюс явное тепло от людей. Общие теплопритоки:

$$q_{т.я.х} = 0,4 \times 150 \times 3 + 40 \times 3 = 300 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Теплоизбытки составляют:

$$Q_{т.я.х} = 300 - 179 = 121 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Для удаления этих теплоизбытков в ЭПОК-180 приточный воздух должен поступать с температурой:

$$t_{пх} = t_{вн} - \frac{Q_{т.я.х}}{L_{п} \rho c_p} = 20 - \frac{121 \times 3,6}{720 \times 1,2 \times 1,0} = 19,5^\circ\text{C.}$$

В ЭПОК-180 температура смеси:

$$t_{см.х} = \frac{l_{пн} t_{пнх} + l_{эж} t_{эж}}{720} = \frac{180 \times 8^\circ + 540 \times 20^\circ}{720} = 17,8^\circ\text{C.}$$

На рис. 2 показано построение на *i-d*-диаграмме расчётного режима работы СКВ в холодный период года в климате Москвы. Расчётная температура t_{пнх} = -28°C в период отопительного сезона может удерживаться не более 60 ч. Основное время отопительного периода температура наружного воздуха значительно выше. Средняя температура наружного воздуха за отопительный период t_{н.ср.от} = -3,1°C. Средние теплопотери через стены и окна ниже и равны:

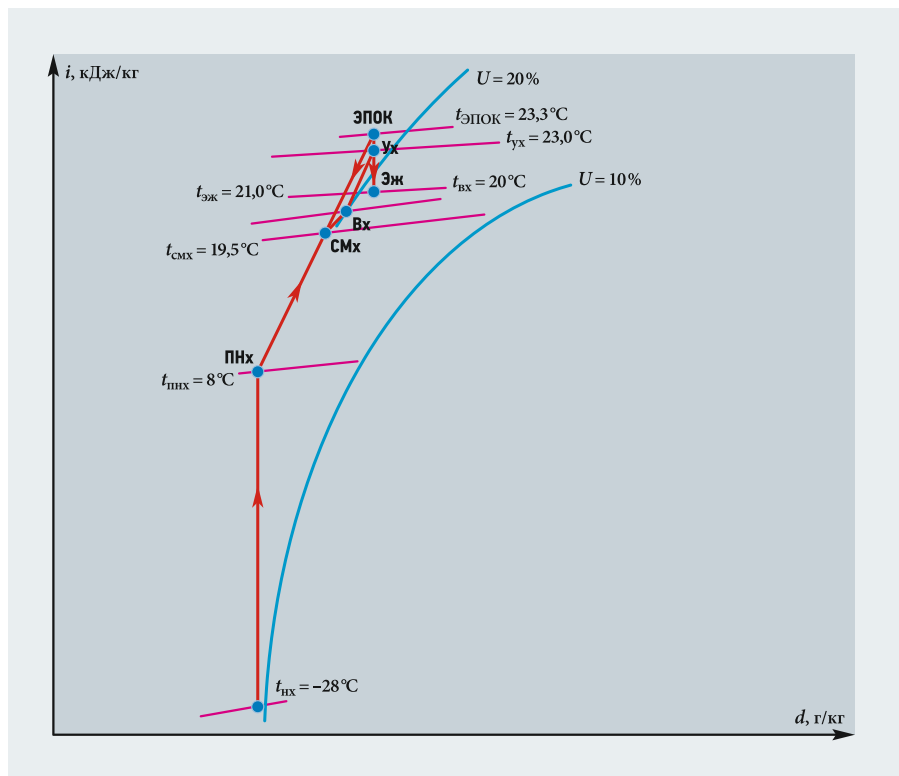
$$t_{т.п.от.ст} = \frac{4,2 \times (20 + 3,1)}{3,1} = 32 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Через остекление теплопотери составляют величину:

$$t_{т.п.от.ос} = \frac{6,0 \times (20 + 3,1)}{0,6} = 231 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

При поступлении к холодному остеклению эжектируемого в ЭПОК-180 воздуха с t_{у.х} = 23°C, охлаждённым им на 2°C, к остеклению может поступать 366 Вт·ч тепла, что устраняет теплопотери через остекление. Служебное оборудование в рабочие часы обычно загружено на 100%, и тепловыделения от него поступают в помещение в количестве 450 Вт·ч. Общие тепловыделения в холодный период года могут быть не менее:

$$Q_{т.пр.х} = 450 + 40 \times 3,0 = 570 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$



•• Рис. 2. Построение на *i-d*-диаграмме расчётного режима работы СКВ в холодный период года в климате Москвы (Нх-ПНх — нагрев наружного воздуха в центральном приточном агрегате; Ух-Эж — отопление холодного остекления эжектируемым воздухом; Эж-ЭПОК — нагрев эжектируемого воздуха в теплообменнике ЭПОК-180; СМх-Вх-Ух — поглощение в помещении влаговыделений)

В солнечные дни через остекление может поступать тепла проникающей солнечной радиации. Поэтому нагрев эжектируемого воздуха в ЭПОК-180 не требуется. Излишки теплоступлений могут отводиться приточным наружным воздухом в количестве:

$$Q_{т.пн.х} = \frac{l_{пн} \rho_{пнх} c_p (t_{вх} - t_{пнх})}{3,6} = \frac{180 \times 1,22 \times 1,0 \times (23 - 8)}{3,6} = 915 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Благодаря нагреву в приточном агрегате санитарной нормы наружного воздуха только до температуры t_{пнх} = 8°C удаётся сократить расход тепла в приточном агрегате и одновременно не допускать перегрева помещений. При подаче в первичную камеру ДЭ (t_{пнх} = 8°C

и смешение в ЭПОК эжектируемого воздуха с остекления t_{в.эж} = 21°C) обеспечивает комфортную температуру приточного воздуха, которая может быть равна:

$$t_{пх} = \frac{t_{пнх} l_{пн} + t_{в.эж} l_{эж}}{l_{п}} = \frac{8 \times 180 + 21 \times 540}{720} = 17,8^\circ\text{C.}$$

перепад температуры в рабочей зоне помещения между приточным и внутренним воздухом будет Δt_{пх} = 20 - 17,8 = 2,2°C, что меньше допустимых 3°C.

В летний период охлаждённый и осушенный в центральном кондиционере наружный воздух воспринимает все влаговыделения в рассматриваемом помещении и поглощает часть явных теплоизбытков. Температура охлаждённого наружного воздуха на выходе из сопел на 1°C выше t_{ох} = 15°C.



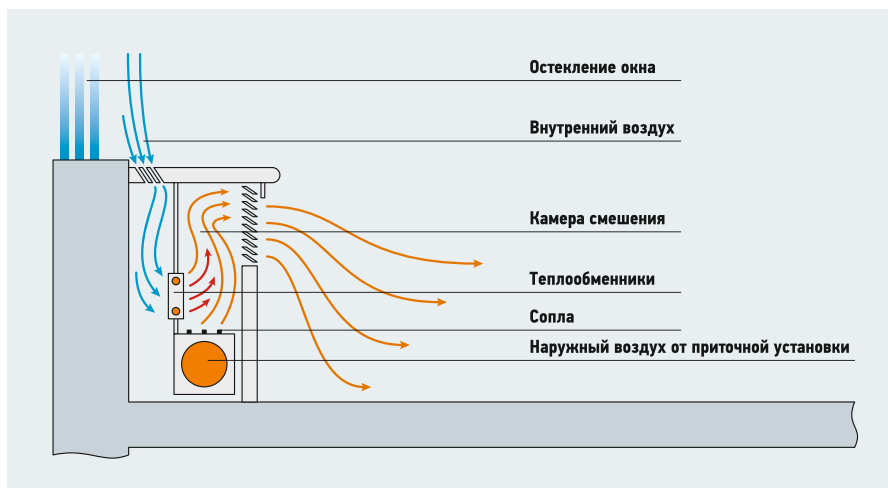


Рис. 3. Принципиальная схема энергосберегающей СКВ с ЭПОК

Количество поглощаемых теплоизбытков составит:

$$Q_{\text{ас.я}} = \frac{I_{\text{пн}} P_{\text{пн}} (t_y - t_{\text{пн}})}{3,6} = \frac{180 \times 1,22 \times (28 - 16)}{3,6} = 732 \text{ Вт}\cdot\text{ч}.$$

Общие расчётные теплоизбытки в помещении состоят из тепловыделений от людей и технологического оборудования, и выше они вычислены в 660 Вт·ч. Теплопритоки через окна и стены рассчитываются по традиционной методике и для рассматриваемого помещения равны 800 Вт·ч. Общие теплопритоки в помещении равны $q_{\text{т.я}} = 660 + 800 = 1460$ Вт·ч.

Охлаждённый наружный воздух способен воспринять 732 Вт·ч, поэтому в теплообменнике ЭПОК-180 должны восприниматься холодной водой остальные теплоизбытки:

$$q_{\text{т.я.ЭПОК}} = 1460 - 732 = 728 \text{ Вт}\cdot\text{ч}.$$

На эжекцию к теплообменнику ЭПОК поступает воздух с поверхности стекла, нагретого солнечной радиацией до температуры 29°C. Для восприятия теплоизбытков в 728 Вт·ч количество эжектируемого воздуха в 540 м³/ч должно быть охлаждено до температуры:

$$t_{\text{ох.эж}} = \frac{29 - (728 \times 3,6)}{540 \times 1,19 \times 1,0} = 24,9^\circ\text{C}.$$

В смесительной камере ЭПОК-180 смешивается охлаждённый наружный и эжектируемый воздух, и температура смеси составит:

$$t_{\text{см}} = t_{\text{п}} = \frac{16 \times 180 + 24,9 \times 540}{180 + 540} = 22,7^\circ\text{C}.$$

Температура $t_{\text{п}} = 22,7^\circ\text{C}$ не ниже принятой в расчётах 20°C, что обеспечивает комфортное воздушораспределение.

На функционирование местно-центральной СКВ с ЭПОК-180 расход электроэнергии связан с центральным кондиционером и работой холодильной машины. На рис. 1 представлено построение на *i-d*-диаграмме влажного воздуха

расчётного режима работы местно-центральной СКВ с ЭПОК-180 в офисном помещении. В журнале АВОК [5] опубликован материал о местно-центральных СКВ с вентиляторными доводчиками (фанкойлы). По сравнению СКВ с ЭПОК системы с вентиляторными доводчиками имеют следующие недостатки:

- срок непрерывной работы электровентиляторных групп из-за износа подшипников скольжения ограничивается восемью годами, так как при износе подшипников появляется шум, и необходимо заменять электровентиляторные группы на новые, что требует дополнительных затрат до 60% от первоначальной стоимости;
- на работу СКВ с вентиляторными доводчиками требуется больше затрат электроэнергии по сравнению с СКВ, оснащёнными ЭПОК, при одинаковых расчётных количествах тепло- и влаговыведений в обслуживаемых помещениях;
- удаление влаговыведений в помещении производится в теплообменнике вентиляторных доводчиков, что требует сооружения линии канализационных труб от поддонов теплообменников, а следовательно, удорожает и усложняет надёжную эксплуатацию системы;
- в работе [5] оговорено, что СКВ с вентиляторными доводчиками нельзя обеспечить постоянство температуры и влажности воздуха в помещении.

В холодный период года применение ЭПОК обеспечивает снижение расходов тепла до 50%. На рис. 3 показана принципиальная схема применения ЭПОК в СКВ. Благодаря эжекции в ЭПОК с

верхности холодного остекления окна, на место холодного воздуха из верхней зоны помещения поступает тёплый воздух с $t_y = 23\text{--}20^\circ\text{C}$ ($t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$). Это позволяет обеспечить отдачу тепла от верхней зоны помещения и увеличить температуру остекления, что приведёт к снижению теплопотерь через остекление. По современным требованиям по теплозащите зданий термическое сопротивление стен увеличено более чем до 3 м²·°C/Вт, но окон — только до 0,6 м²·°C/Вт. Окна остаются наиболее значимым звеном в конструкции зданий при определении теплопотерь, которые нужно компенсировать работой систем отопления.

Широкое применение традиционных систем отопления с конвекторами в качестве приборов отопления приводит к тому, что теплопотери через остекление возрастают. Это обусловлено наличием струи нагретого в конвекторе внутреннего воздуха, который поднимаясь с температурой 40/50°C и перекрывает зону остекления. Перепад между наружным воздухом расчётной температурой для климата Москвы $t_{\text{нх}} = -28^\circ\text{C}$ и комфортным $t_{\text{в,х}} = 20^\circ\text{C}$ возрастает:

$$t_{\text{в,х}} - t_{\text{н,х}} = 40 + 28 > 20 + 28^\circ\text{C}.$$

Из примера видно, что теплопотери возрастают. При применении ЭПОК в качестве прибора отопления по трубкам теплообменника проходят горячая вода, которая даже при расчётной $t_{\text{п,х}} = -28^\circ\text{C}$ не будет выше 60°C. Обычные режимы отопления требуют начальную температуру горячей воды не выше 45°C.

На подающий трубопровод к теплообменнику ЭПОК устанавливается автоматический клапан, который изменяет расход горячей воды при отклонении $t_{\text{в,х}} \leq 20^\circ\text{C}$, а летом изменяет расход холодной воды при изменении $t_{\text{в}} > 25^\circ\text{C}$.

Подача приточного воздуха от ЭПОК в рабочую зону, где находятся люди, повышает санитарно-гигиенические качества работы СКВ. Повышение температуры удаляемого из верхней зоны помещения позволяет в холодный период года увеличить энергетическую эффективность работы системы утилизации выбросного тепла на нагрев приточного наружного воздуха [2, 3].

Широкое применение традиционных систем отопления с конвекторами в качестве приборов отопления приводит к тому, что теплопотери через остекление возрастают

1. Кокорин О.Я. Установка кондиционирования воздуха. — М.: Машиностроение, 1978.
2. Кокорин О.Я. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха. — М.: ООО «ЛЭС», 2007.
3. Кокорин О.Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования. — М.: Изд-во АСВ, 2013.
4. АВОК Стандарт. Здания жилые и общественные. Норма воздухообмена. — М.: НП «АВОК», 2002.
5. Тарабанов М.Г. Расчёт систем кондиционированного воздуха с центральными кондиционерами и фанкойлами // Журнал «АВОК».