

Система кондиционирования воздуха и холодоснабжения помещений искусственных катков

Д-р техн. наук, проф.
О.Я. КОКОРИН
МГСУ

За последние годы во многих городах России построены или планируется строительство искусственных катков в закрытых помещениях. Поэтому важно проанализировать и обобщить как отечественный, так и зарубежный опыт сооружения искусственных катков. В отечественной литературе одним из руководящих материалов по этому направлению служит справочник [2] (глава VIII «Искусственные катки»). Из зарубежных источников следует отметить справочник [5] (раздел ICE RINKS). Однако в этих изданиях отсутствуют рекомендации по схемным решениям и методам расчета систем кондиционирования воздуха (СКВ) для помещений искусственных катков.

В нашей стране работы по созданию систем холодоснабжения и СКВ для зданий искусственных катков различного назначения успешно проводятся фирмой YORK International. Значительное преимущество этой фирмы состоит в том, что она производит собственное оборудование как для намораживания ледяного поля, так и для СКВ. Возможности реализации комплексных принципиальных решений схем и выбор единообразного оборудования для холодоснабжения ледяного поля и работы СКВ позволяют фирме YORK International реализовать наиболее целесообразные и энергоэффективные решения систем для искусственных катков.

В публикуемой статье рассматриваются особенности СКВ и режимы функционирования оборудования в зоне ледяного поля помещений искусственных катков. Стандартные размеры ледового поля для игры в хоккей с шайбой составляют 30×60 м. Слой льда получают намораживанием воды на поверхности охлаждающей бетонной плиты. Углы поля закруглены.

В работах [2, 5] даны рекомендации по возможным конструктивным решениям охлаждающей бетонной плиты, внутри которой заложены трубы для циркуляции хладоносителя. Приводятся различные схемы укладки труб в бетонные плиты и контуров циркуляции хладоносителя, обеспечивающие равномерность распределения температур по поверхности бетонной плиты, на которую намораживается лед. Фирмой YORK International разработаны оригинальные конструкции змеевиков охлаждения бетонных плит для намораживания льда и используются высокоэффективные холодильные машины.

The paper is devoted to the problem of designing of air conditioning and refrigeration supply systems for artificial skating-rinks in closed areas. The requirements to characteristics of ice change according to the type of sports competition. The company YORK International has developed unconventional construction of ice making equipment and air conditioning systems in the skating rinks.

В зависимости от вида спортивных мероприятий изменяются требования к характеристикам льда. При игре в хоккей требуется жесткий лед, температура поверхности которого -6°C . Для фигурного катания лед должен быть более мягким с температурой поверхности $-3...-1,5^{\circ}\text{C}$. Для скоростного бега на коньках температура льда должна быть более высокой: $-1,5...-0,5^{\circ}\text{C}$.

Поддержание требуемой температуры льда обеспечивают холодильные машины, которые обычно подбирают по холодопроизводительности для условий намораживания льда толщиной 25–30 мм за 24 ч. Как правило используют машины холодопроизводительностью до 600 кВт.

Наряду с работой холодильных машин качество поверхности льда обеспечивается функционированием СКВ, обслуживающей зону ледяного поля и обеспечивающей выполнение двух задач:

- поддержание в зоне поверхности ледяного поля температурно-влажностного режима, препятствующего образованию тумана (по данным работы [5], при температуре поверхности льда -6°C отсутствие тумана обеспечивается путем поддержания температуры воздуха над поверхностью $5...15^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности ниже 80 %);

- исключение конденсации водяных паров на холодной поверхности металлических и строительных конструкций перекрытия (это достигается поддержанием температуры поверхности строительных конструкций выше температуры точки росы окружающего воздуха).

Схема воздухораспределения СКВ, обслуживающей зону ледяного поля, должна создавать воздушную завесу и препятствовать попаданию более теплого и влажного воздуха от зоны зрительских трибун ко льду. Это достигается струйной подачей приготовленного приточного воздуха через сопла, расположенные в верхней части помещения. Конструкция сопел должна предусматривать изменение направления струй.

Тепловой режим над поверхностью ледяного поля определяется конвективны-

ми потоками теплоты от окружающего воздуха и лучистыми потоками теплоты от светильников и нагретых поверхностей конструкций ферм у потолка, а также от внутренних поверхностей перекрытия здания искусственного катка. Величину конвективного потока теплоты (Вт) вычисляют по формуле

$$Q_{\text{т.кон}} = F_{\text{л.п}} \alpha_{\text{кон}} (t_{\text{в.л}} - t_{\text{л}}), \quad (1)$$

где $F_{\text{л.п}}$ — поверхность ледяного поля, м^2 ;
 $t_{\text{в.л}}$ — температура воздуха над поверхностью льда, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{л}}$ — температура поверхности льда, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент конвективной теплопередачи $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$ от воздуха к поверхности льда в работе [5] рекомендуется определять по формуле

$$\alpha_{\text{кон}} = 3,41 + 3,55 v_{\text{в.л}}. \quad (2)$$

Скорость воздуха над поверхностью льда рекомендуется сохранять на уровне $v_{\text{в.л}} = 0,25 \text{ м/с}$.

Тогда коэффициент конвективной теплопередачи

$$\alpha_{\text{кон}} = 3,41 + 3,55 \cdot 0,25 = 4,29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

Лучистое поступление теплоты от внутренней поверхности перекрытия здания катка зависит от температуры поверхности строительных ограждений $t_{\text{пов}}$ и температуры поверхности льда $t_{\text{л}}$.

В работе [2] проведены расчеты и построен график для определения удельного потока радиационной теплоты $q_{\text{рад}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$. На рис. 1 представлен график для двух крайних расчетных режимов: твердого льда $t_{\text{л}} = -6^{\circ}\text{C}$ (для игры в хоккей) и мягкого льда $t_{\text{л}} = -1^{\circ}\text{C}$ (для скоростного катания).

Лучистый поток теплоты от светильников зависит от их мощности. В работе [3] на основе практики проектирования катков в США дается удельный показатель зависимости величины потока лучистой теплоты от освещения на поверхности ледяного поля $q_{\text{осв}} = 35,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Если вытяжной воздух удаляется из верхней зоны помещения катка, то до 40 % теплоты, выделяемой осветительными приборами, может восприниматься вытяжным воздухом. Наиболее трудные условия для работы СКВ в зоне ледяного поля создаются в теплый период года. При игре в хоккей в зоне ледяного поля ($t_{\text{л}} = -6^{\circ}\text{C}$) на-

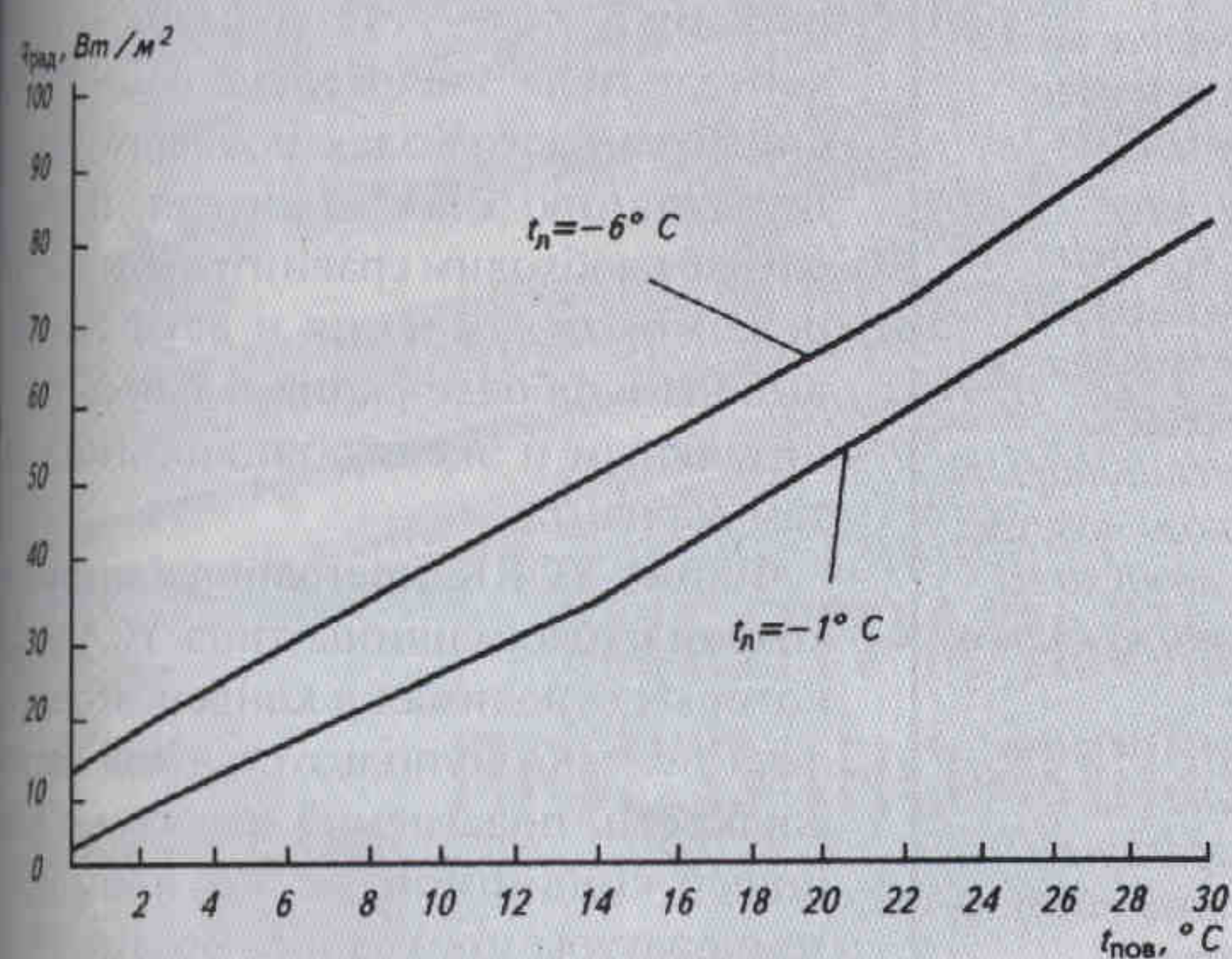


Рис. 1. Удельные теплопритоки лучистого тепла к поверхности ледяного поля от окружающих поверхностей

полится постоянно 50 человек. По санитарным нормам для такого числа людей в зону их пребывания необходимо подавать приточный наружный воздух при минимальном расходе:

$$L_{\text{п.н}} = 80 \cdot 50 = 4000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При выполнении тяжелой работы 50 человек выделяют:

$$\text{теплоту } Q_{\text{т.люд}} = 50 \cdot 180 = 9000 \text{ Вт};$$

$$\text{влагу } W_{\text{люд}} = 50 \cdot 170 = 8500 \text{ г/ч}.$$

По требованиям СНиП с целью обеспечения надежности принимаем, что зону ледяного поля должны обслуживать два приточных кондиционера. Производительность их по воздуху определяется условиями равномерного заполнения приточным воздухом зоны над ледяным полем. При размерах ледяного поля 60×30 м наилучшие результаты по равномерности воздушораспределения достигаются при подаче приточного воздуха через сопла, располагаемые на высоте до 15–20 м с двух сторон вдоль ледяного поля.

Конструкцию сопловых воздушораспределителей французских фирм выбираем по каталогу [6], где (на с. 56) приведены конструкции и номограммы для подбора режимов работы сопловых воздушораспределителей. Принимаем тип JD130 (присоединительные диаметры 250 мм и 140 мм). Расстояние от среза сопла до зоны ледяного поля в помещениях искусственных катков с трибунами для зрителей должно быть не менее 25...30 м.

На рис. 2 дана схема двусторонней подачи воздуха на ледяное поле. Из схемы видно, что приточные струи после выхода из сопла постепенно расширяются под углом 20° и на расчетном расстоянии $L_r = 25$ м скорость приточного воздуха снижается до требуемого значения $v_r = 0,25$ м/с. Для выпуска через сопло JD130 диаметром 140 мм приточного воздуха при расходе $L_{\text{п}} = 800$ м³/ч требуется обеспечить перед соплом давление

воздушного потока 150 Па. При этом на выходе уровень шума составит 35 дБ(А), что вполне допустимо для спортивных залов.

После нанесения на план ледяного поля размеров раскрывшихся приточных струй, полностью перекрывающих его площадь, определяют требуемое число сопел, устанавливаемых вдоль приточного воздуховода, располагаемого по длинной стороне ледяного поля. Построение показало, что на приточном воздуховоде целесообразно установить по 21 соплу с каждой стороны. Тогда общее количество приточного воздуха в зону ледяного поля от одного кондиционера составит

$$L_{\text{п}} = l_{\text{п}} \sum B = 800 \cdot 21 = 17000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

На схеме (см. рис. 2) показано, что под потолком над ледяным полем раз-

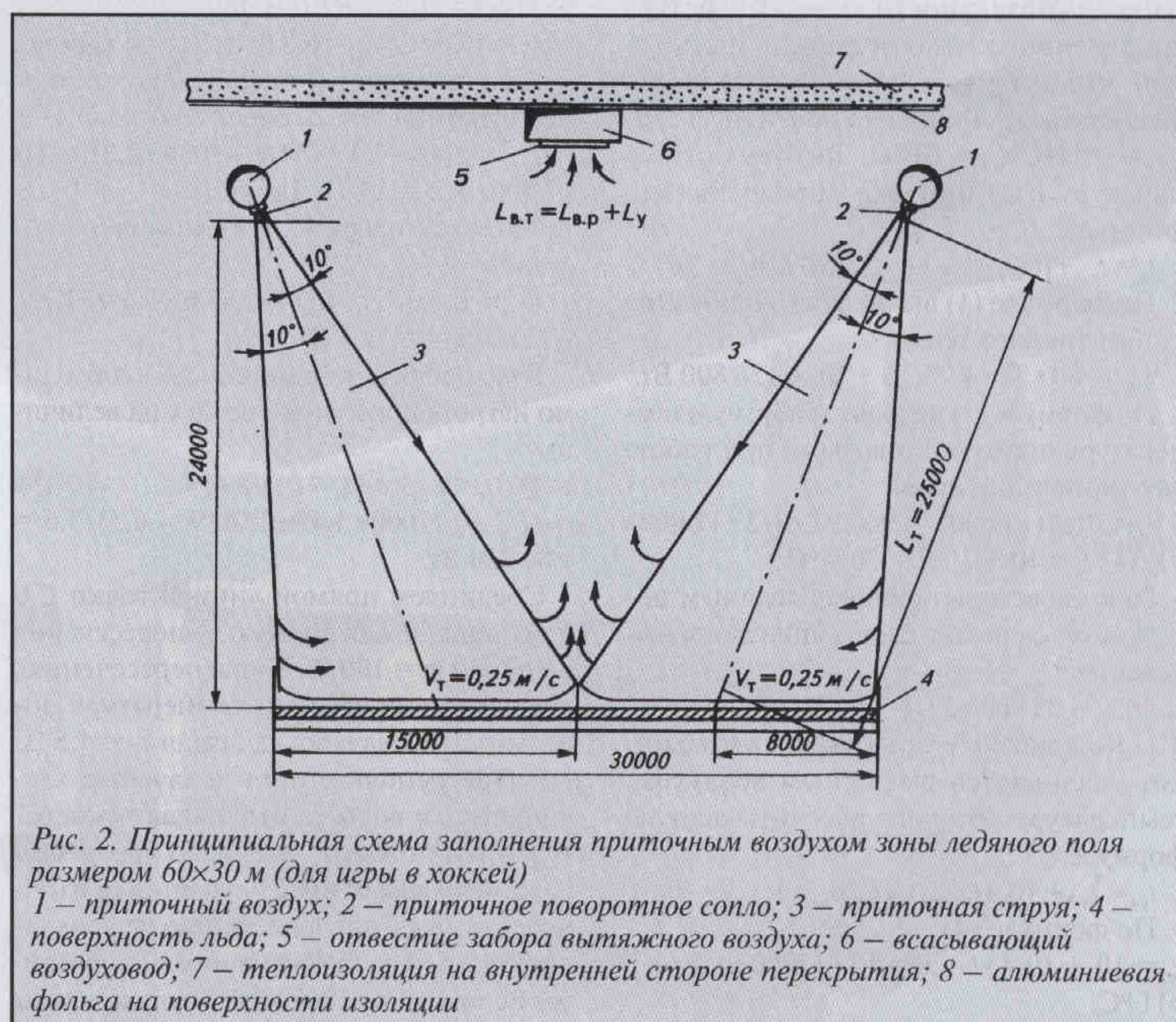
мещается всасывающий воздуховод 6, в который через отверстие 5 поступает на вытяжку рециркуляционный $L_{\text{в.р}}$ и сбрасываемый в атмосферу вытяжной воздух $L_{\text{в}}$. Для сохранения воздушного баланса в зоне ледяного поля катка на каждый кондиционер расход приточного воздуха ($L_{\text{п}} = 17000$ м³/ч) примерно равен расходу вытяжного ($L_{\text{в}} = 17000$ м³/ч).

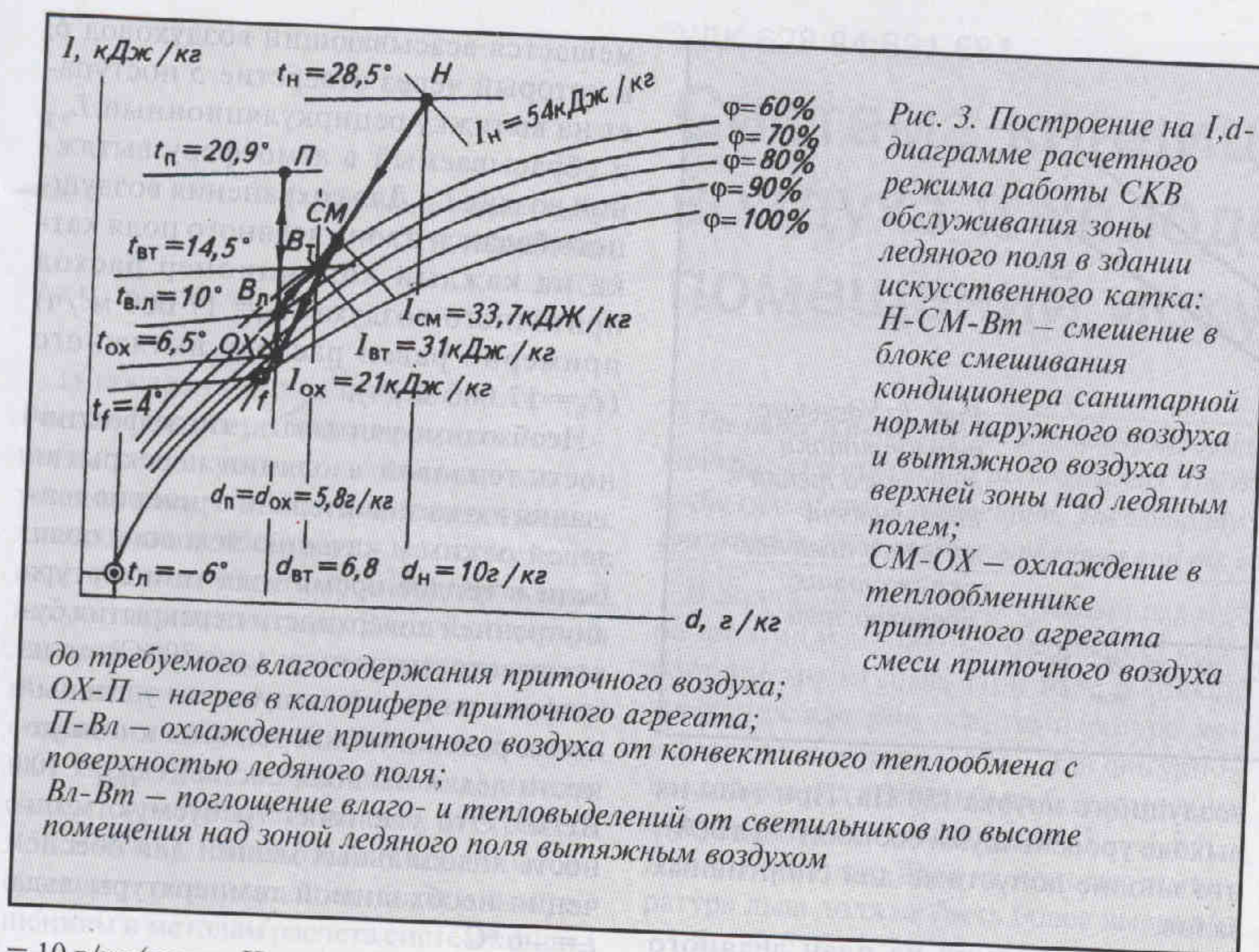
Необходимо учитывать, что эффективность тепловой изоляции перекрытия здания катка значительно влияет на тепловой режим и качество ледового поля. Если в теплое время года температура внутренней поверхности перекрытия будет высока (например, $t_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$), то из графика на рис. 1 следует, что удельный поток радиационной теплоты к поверхности ледяного поля составит $q_{\text{рад}} = 100$ Вт/м². Это увеличит требуемую мощность холодильных машин для обеспечения необходимой температуры льда $t_{\text{л}} = -6^\circ\text{C}$.

В работе [5] показано, что если на внутреннюю поверхность потолка закрепить маты тепловой изоляции с алюминиевой фольгой на поверхности, обращенной внутрь помещения, то коэффициент лучистого отражения достигнет $\beta_p = 0,05$. Тогда удельный поток радиационной теплоты к ледяному полю составит

$$q'_{\text{рад}} = q_{\text{рад}} \beta_p = 100 \cdot 0,05 = 5 \text{ Вт/м}^2.$$

В климатических условиях Москвы в теплый период года параметры наружного воздуха по СНиП соответствуют параметрам Б: $t_{\text{н}} = 28,5^\circ\text{C}$, $I_{\text{н}} = 54$ кДж/кг; $d_{\text{н}} =$





= 10 г/кг (точка Н на рис. 3). Если лед используется для игры в хоккей ($t_{\text{л}} = -6^\circ\text{C}$), то в зоне проведения игры на ледяном поле поддерживаются условия (точка В): $t_{\text{в.л}} = 10^\circ\text{C}$, $\phi_{\text{в.л}} = 70\%$, $d_{\text{в.л}} = 5,5$ г/кг. В каждом кондиционере готовится 17 000 м³/ч приточного воздуха, состоящего из 2000 м³/ч наружного и 15 000 м³/ч рециркуляционного.

На рис. 3 показано построение на I, d -диаграмме расчетного режима работы СКВ ледяного поля в теплый период года.

Для избежания конденсации водяных паров на поверхности льда температура $t_{\text{л}}$ приточного воздуха должна быть такой, чтобы при конвективной теплоотдаче от воздуха к поверхности льда стала не ниже $t_{\text{в.л}} = 10^\circ\text{C}$. Требуемую температуру ($^\circ\text{C}$) притока определяют по формуле

$$t_{\text{п}} = t_{\text{в.л}} + [(Q_{\text{т.кон}} - Q_{\text{т.лю}}) / (L_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{р}})] \quad (3)$$

По формуле (1) вычисляют количество конвективного тепла:

$$Q_{\text{т.к}} = 60 \cdot 30 \cdot 4,75(10 + 6) = 136\,800 \text{ Вт.}$$

По формуле (3) находят требуемую температуру приточного воздуха при работе двух кондиционеров:

$$t_{\text{п}} = 10 + [(13\,6800 - 9000) / (2 \cdot 17\,000 \cdot 1,24 \cdot 1)] = 10 + 10,9 = 20,9^\circ\text{C}.$$

Работа светильников над ледяным полем обуславливает следующие тепловыделения:

$$Q_{\text{т.осв}} = 30 \cdot 60 \cdot 35,7 = 64\,260 \text{ Вт.}$$

Примерно 40 % теплоты от светильников усваивается вытяжным воздухом, температуру которого рассчитывают по формуле ($^\circ\text{C}$)

$$t_{\text{вт}} = t_{\text{в.л}} + (0,4 Q_{\text{т.осв}}) / (L_{\text{вт}} \rho_{\text{вт}} c_{\text{р}}) \quad (4)$$

По формуле (4)

$$t_{\text{вт}} = 10 + (0,4 \cdot 64\,260) / (2 \cdot 17\,000 \cdot 1,2 \cdot 1) \approx 11^\circ\text{C}.$$

К вытяжному воздуху эжектируется часть теплого воздуха с потолка и из приточных струй. С учетом этого примем $t_{\text{вт}} = 14,5^\circ\text{C}$.

Воздух у поверхности льда воспринимает водяные пары, образующиеся в пограничном слое у поверхности льда. Эти водяные пары воспринимаются и уносятся с вытяжным воздухом.

Кроме того, воспринимаются влаговыделения от игроков:

$$\Delta d_{\text{ас}} = \sum W_{\text{лю}} / (\sum L_{\text{пн}} \cdot \rho_{\text{пн}});$$

$$\Delta d_{\text{ас}} = 8500 / (2 \cdot 17\,000 \cdot 1,22) = 0,2 \text{ г/кг.}$$

С учетом этого параметры вытяжного воздуха в точке ВТ (см. рис. 3):

$$t_{\text{вт}} = 14,5^\circ\text{C}; d_{\text{вт}} = 6,8 \text{ г/кг}; I_{\text{вт}} = 31 \text{ кДж/кг.}$$

На охлаждение и осушку в кондиционер будет поступать смесь с энтальпией:

$$I_{\text{см}} = (2000 \cdot 1,15 \cdot 54 + 15000 \cdot 1,21 \cdot 31) / 17\,000 \cdot 1,2 = 33,7 \text{ кДж/кг.}$$

Тепловая нагрузка кондиционера составит

$$Q_{\text{ох}} = L_{\text{п}} \rho_{\text{п}} (I_{\text{см}} - I_{\text{ох}}) = 17000 \cdot 1,24 (33,7 - 21) / 3,6 = 74\,366 \text{ Вт.}$$

В калорифере кондиционера необходимо нагреть приточный воздух на величину

$$Q_{\text{т.кал}} = L_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{р}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ох}}) / 3,6; \quad (5)$$

$$Q_{\text{т.кал}} = 17000 \cdot 1,19 \cdot 1 (20,9 - 6,5) / 3,6 = 80\,920 \text{ Вт.}$$

Соединяем прямой линией точки СМ и ОХ, продолжая прямую до пересечения с кривой $\phi = 100\%$. Точка пересечения f соответствует средней температуре поверхности воздухоохладителя $t_{\text{ф}} = 4,5^\circ\text{C}$ [1]. При использовании в качестве хладоносителя воды ее начальная температура ограничена $t_{\text{wl}} = 2^\circ\text{C}$. В требуемом режиме охлаждения и осушения приточного воздуха поверхность воздухоохладителя должна быть значительно развита. Если в качестве охлаждающей среды

применить гликоль с начальной температурой $t_{\text{аfl}} = -2^\circ\text{C}$, то размеры воздухоохладителя значительно сократятся и снизится расход электроэнергии на рециркуляцию хладоносителя. В общем случае необходим сравнительный анализ режимов охлаждения и осушения для выбора наиболее рационального по капитальным и эксплуатационным затратам варианта.

Фирма YORK International выпускает холодильные машины типа YCAM/R, в которых отводимая в конденсаторе теплота полезно используется для нагрева жидкости, подаваемой насосом в калорифер кондиционера для повышения температуры приточного воздуха. В испарителе этих машин охлаждается антифриз до $t_{\text{аfl}} = -2^\circ\text{C}$ или вода до $t_{\text{wl}} = 2^\circ\text{C}$, которые насосом подаются в воздухоохладитель, где охлаждается и осушается приточный воздух (процесс СМ-ОХ на рис. 3).

В холодный период года холодильная машина в СКВ не работает и для нагрева приточного воздуха в калорифер подается теплота от центрального источника или от конденсаторов холодильных машин, поддерживающих требуемую температуру льда.

В Зеленограде (Москва) фирма YORK International имеет завод для производства центральных кондиционеров [4]. Отличительная особенность производства кондиционеров состоит в том, что благодаря уникальной технологии размерный шаг производимых центральных кондиционеров составляет лишь 50 мм, что позволяет придать им любую наиболее целесообразную форму для размещения на выделенных ограниченных площадях здания.

В последующих статьях будут рассмотрены режимы работы СКВ для зрительских трибун при различных вариантах использования помещения катка (тренировки, концертный зал), а также вопросы создания систем холодоснабжения для намораживания льда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования. — М.: Машиностроение, 1978.
2. Лухтештейн Э.Л. Искусственные катки. с.222–241 в справочнике: Различные области применения холода. — М.: Агропромиздат, 1985.
3. Монтейн Р. Проектные решения по ОВК для многоцелевых спортивных арен/Пер. с англ.//АВОК. 1996. № 3/4.
4. Производство центральных кондиционеров YORK прописалось в Москве//Холодильная техника. 2000. № 1.
5. ASHRAE Refrigeration Hand book. Chapter 33. Ice Rinks, 1994.
6. France Air. Export Program, 1996.