

УДК 628.8, 697.9

Оценка влияния влажности воздуха на качество микроклимата в зале ледового катка и на состояние ледовой поверхности

Русаков С.В. rsvit@mail.ru

ЗАО «Балтийская Климатическая Компания»
Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., д.32

В работе рассматриваются основные закономерности влияния влажности воздуха, окружающего ледовую площадку в условиях залов искусственных катков и ледовых арен, на функциональные свойства самих залов, на микроклимат внутри и на качественные характеристики ледовой поверхности. Рассматриваются отрицательные явления, связанные с высокой влажностью в зале, такие как образование тумана в объеме, выпадение конденсата на ограждающих конструкциях. Приводится количественная оценка влияния влажности воздуха на величину тепловой нагрузки на лед. Дается методика расчета массового потока конденсации водяных паров из воздуха в зависимости от параметров микроклимата в зал, как важной составляющей тепло-влажностной нагрузки зала для проектирования систем кондиционирования воздуха. Рассматриваются требования различных ледовых видов спорта к показателям влажности воздуха у поверхности льда, как исходные данные для выбора расчетных параметров влажности при проектировании систем кондиционирования. Материалы статьи могут быть использованы для инженерных расчетов при проектировании, строительстве и эксплуатации искусственных ледовых катков.

Ключевые слова: крытый ледовый каток, проектирование искусственных ледовых катков, поддержание влажности воздуха в зале катка, кондиционирование воздуха ледовых катков, теплообмен ледовой поверхности с окружающим воздухом.

Evaluation of the effect of humidity on the quality of the microclimate in the ice rink and on the condition of the ice surface

Rusakov S.V. rsvit@mail.ru

Technical Director of JSC "Baltic Climate Company"
Saint-Petersburg, Bolshoy Sampsonyevskiy ave., 32

The paper examines the main regularities of the influence of humidity of the air surrounding the ice rink in the conditions of the halls of artificial skating rinks and ice arenas, on the functional properties of the halls, on the microclimate inside and on the qualitative characteristics of the ice surface. Discusses the negative effects associated with high humidity in the room, such as the formation of fog in volume, condensation in building envelopes.

The quantitative evaluation of the influence of humidity on the magnitude of the heat load on the ice. Given the method of calculation of the mass flow condensation water vapor from the air, depending on the parameters of the microclimate in the room, as an important component of the heat and humidity load of the hall for the design of air conditioning systems.

Discusses the requirements of various ice sports to the indicators of humidity at the surface of ice, as the input data for selecting the calculated humidity parameters in the design of air conditioning systems. The article can be used for engineering calculations in the design, construction and operation of artificial ice rinks.

Keywords: indoor ice skating rink, designing artificial ice rinks, maintaining humidity in the hall of the rink, air conditioning in ice skating rinks, ice heat exchange surface with the surrounding air.

За последние годы в России было построено немалое количество крытых ледовых катков и многофункциональных спортивно-развлекательных комплексов с искусственным льдом. При сооружении этих объектов использовался как прежний отечественный опыт, так и передовой современный от зарубежных компаний. Вместе с тем отсутствие на сегодняшний день доступных достоверных методик для проектирования инженерных систем таких объектов приводит к ошибкам в проектах, имеющих отрицательные последствия.

Поддержание требуемых параметров влажности в объеме залов с ледовой площадкой является технически непростой и очень затратной задачей. Игнорирование или недостаточное понимание этих требований проектировщиками систем поддержания микроклимата, экономия средств заказчиком за счет этих систем, приводят иногда к тому, что в зале устанавливаются лучшие климатические условия при выключенных системах кондиционирования, чем при работающих.

Одной из наиболее пагубных проблем залов катков с плохо регулируемой влажностью является выпадение тумана над ледовой площадкой. Это не что иное, как объемная конденсация влаги из воздуха, охлажденного ниже температуры точки росы. Такое охлаждение происходит благодаря процессу теплообмена воздуха с поверхностью льда. Объемная конденсация может наблюдаться в виде слоя дымки у поверхности, а может при определенных условиях заполнять весь объем внутри ограждения ледовой площадки. Туман значительно ухудшает условия видимости, а во время трансляций по телевидению просто недопустим.



Условия образования тумана над ледовым полем можно проиллюстрировать с помощью I-d диаграммы (рисунок 1). Для льда температурой -6°C воздух, граничащий с поверхностью, в процессе установившегося тепло-массообмена приобретает параметры, насыщенного влажного воздуха с температурой около -6°C . Перемешивание влажного окружающего воздуха с охлажденными массами при определенных условиях приводит к объемной конденсации водяных паров, то есть туману.

Определить на диаграмме область параметров воздуха в зоне ледовой площадки, при которых возможно выпадение тумана, можно, проведя на диаграмме через точку параметров у льда касательную

к линии насыщения, правее касательной и будет обозначена «зона тумана». Тогда для воздуха с температурой $+20^{\circ}\text{C}$ (смотри рисунок 1) критическим значением влажности будет около 55% или 8 г/кг.

Для реального появления тумана требуется выполнение еще нескольких условий, выявление которых требует дополнительного изучения, но для практического проектирования достаточно обозначить критические параметры.

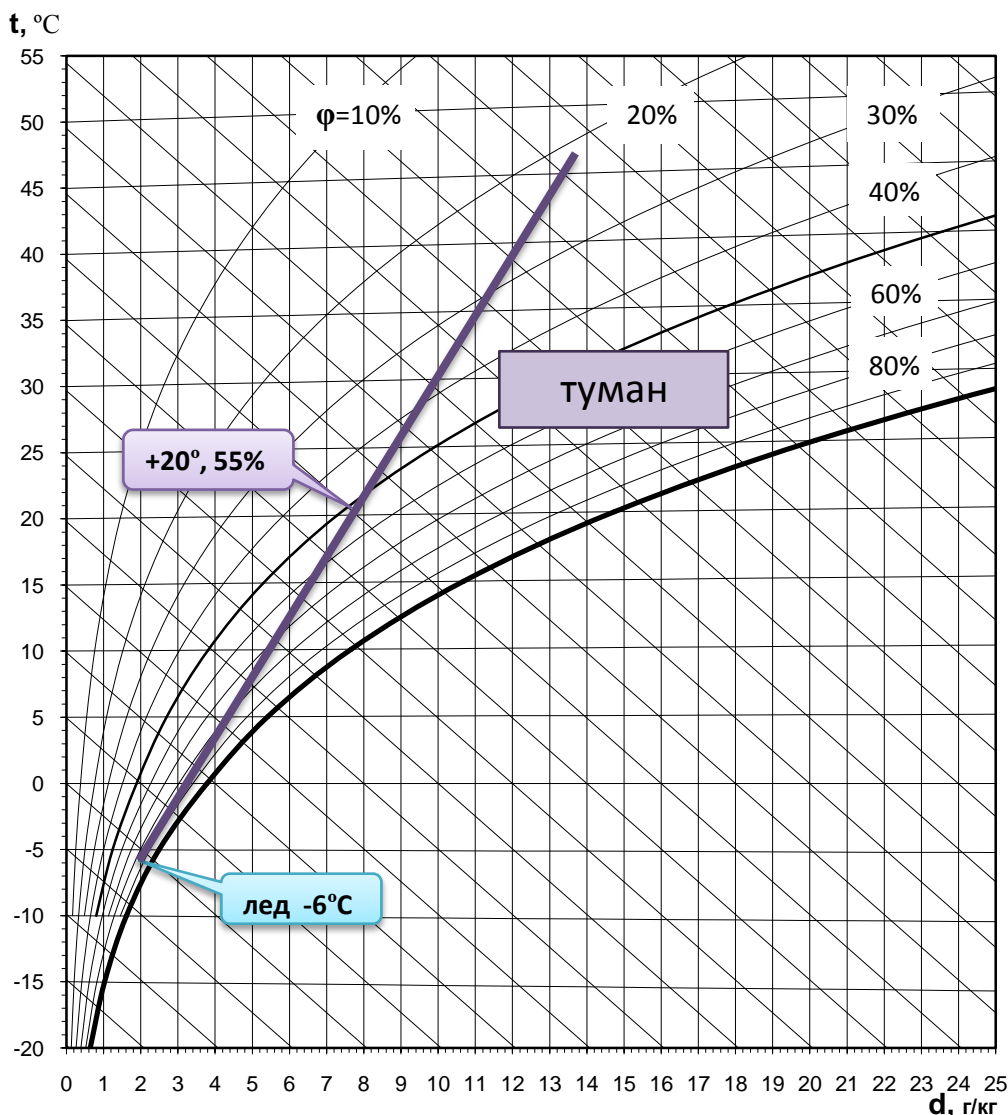


Рис.1. Иллюстрация в I-d диаграмме образования тумана в воздухе над ледовой площадкой в зале катка

Еще одна проблема, которая возникает в залах ледовых арен с неподдерживаемой влажностью воздуха, - образование конденсата на поверхностях, окружающих ледовую поверхность вследствие радиационного охлаждения. В наибольшей степени охлаждению подвергаются поверхности потолка и подвесных конструкций под потолком. Интенсивность лучистого теплообмена зависит от взаимного расположения этих поверхностей (расстояния между ними, угла наклона, отношения размеров), материалов из которых выполнен потолок и подвесные конструкции, а также температур поверхностей. Охлаждение поверхностей в какой-то степени компенсируется конвективными потоками воздуха, возникающими по этой причине.

Если установившаяся в результате такого сложного теплообмена температура поверхности ниже точки росы окружающего воздуха, на поверхности выпадает конденсат. Когда явление носит

систематический характер, происходит коррозия и преждевременное разрушение конструкций. При значительных количествах конденсата наблюдается каплепад на ледовую поверхность с образованием наростов и значительным ухудшением качества льда.

Результаты расчетов сложного теплообмена для поверхности потолка ледового тренировочного зала представлены на I-d диаграмме (рисунок 2).

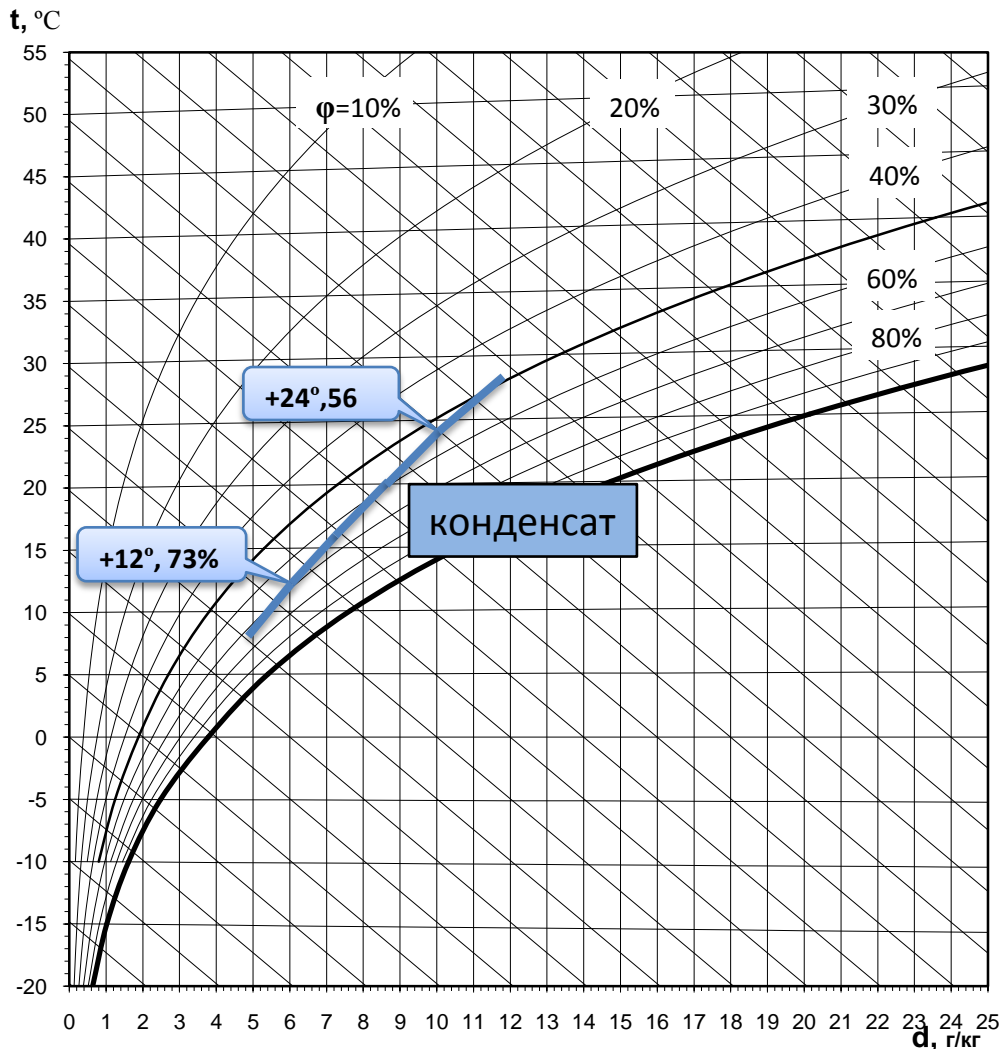


Рис.2 Иллюстрация в I-d диаграмме образования конденсата на потолке, охлаждаемом за счет лучистого теплообмена с ледовой поверхностью в зале тренировочного катка

Расчеты проведены для зала тренировочного катка размерами 66×39 м. при высоте 9 м., с ледовой площадкой 60*30 м. Потолок выполнен из материалов, имеющих средний коэффициент излучения, соответствующий степени черноты $\varepsilon_{\text{опр}} = 0,9$. Температура льда в расчетах принята - 5°C.

Обозначенная на диаграмме область правее линии ограничивает параметры воздуха, при которых возможно выпадение конденсата.

При температуре в зале + 14°C степень охлаждения потолка (разница между температурой поверхности и воздуха) составляет около 6,3°C, и при влажности воздуха более 65,7% может наблюдаться выпадение конденсата. Для температуры +20°C соответственно критическая величина относительной влажности составит около 60%.

Заметим, что с увеличением размеров зала катка, интенсивность охлаждения поверхностей уменьшается, и требования по влажности воздуха для предупреждения образования конденсата также смягчаются.

Более подробно расчеты режимов лучистого теплообмена основных поверхностей в залах ледовых арен разных размеров рассмотрены в работе [1].

Выше были описаны наиболее пагубные последствия неправильного регулирования влажности воздуха у льда, которые категорически недопустимы на катках.

При соблюдении более приемлемых условий (параметры влажности меньше критических) необходимо учитывать, что из воздуха почти постоянно происходит конденсация водяных паров на поверхности льда, имеющей температуру ниже точки росы.

Суммарный тепловой поток в результате конвективного теплообмена воздуха на лед совместно с конденсацией водяных паров может быть рассчитан по формуле [2], [3],[4]:

$$q_{(\text{конв.}+\text{конд.})} = \xi q_{\text{конв.}} = \xi \alpha_{\text{конв.}} (t_{\text{в}} - t_{\text{л}}) \quad (1)$$

где: $t_{\text{в}}$ - температура воздуха, °С;

$t_{\text{л}}$ - температура льда, °С;

$\alpha_{\text{конв.}}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²*К);

ξ – коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи за счет влаговываждения:

$$\xi = \frac{i_{\text{в}} - i_{\text{в.л}}'' - i_{\text{л}}(d_{\text{в}} - d_{\text{в.л}}'')}{c_{\text{рв}}(t_{\text{в}} - t_{\text{л}})} \quad (2)$$

где: $i_{\text{в}}$ - энтальпия воздуха в объеме зала, кДж/кг;

$i_{\text{в.л}}''$ - энтальпия воздуха в состоянии насыщения при температуре поверхности льда, кДж/кг;

$i_{\text{л}}$ - энтальпия льда, кДж/кг;

$d_{\text{в}}$ - влагосодержание воздуха в объеме зала, г/кг;

$d_{\text{в.л}}''$ - влагосодержание воздуха в состоянии насыщения при температуре поверхности льда, г/кг;

$c_{\text{рв}}$ - теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг·К).

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента влаговываждения от влагосодержания воздуха над льдом при температуре льда $t_{\text{л}} = -6^{\circ}\text{C}$, температурах воздуха $t_{\text{в}} = +12, +14, +16^{\circ}\text{C}$.

График зависимости иллюстрирует, насколько меняется интенсивность результирующего теплообмена (конвекция +конденсация) ледовой поверхности с окружающим воздухом за счет изменения составляющей конденсации в зависимости от содержания влаги в воздухе.

При $d_{\text{в}} = d_{\text{в.л}}'' \approx 2,3$ г/кг, соответствующем насыщенному воздуху у поверхности, мы имеем дело только с конвекцией, не осложненной массообменом ($\xi = 1$). При влагосодержании $d_{\text{в}} = 10$ г/кг, интенсивность тепломассобмена увеличивается по сравнению с чистой конвекцией в 2÷2,2 раза (в зависимости от температуры воздуха). Соответственно растет и нагрузка на основную станцию холодоснабжения, поддерживающую лед на площадке.

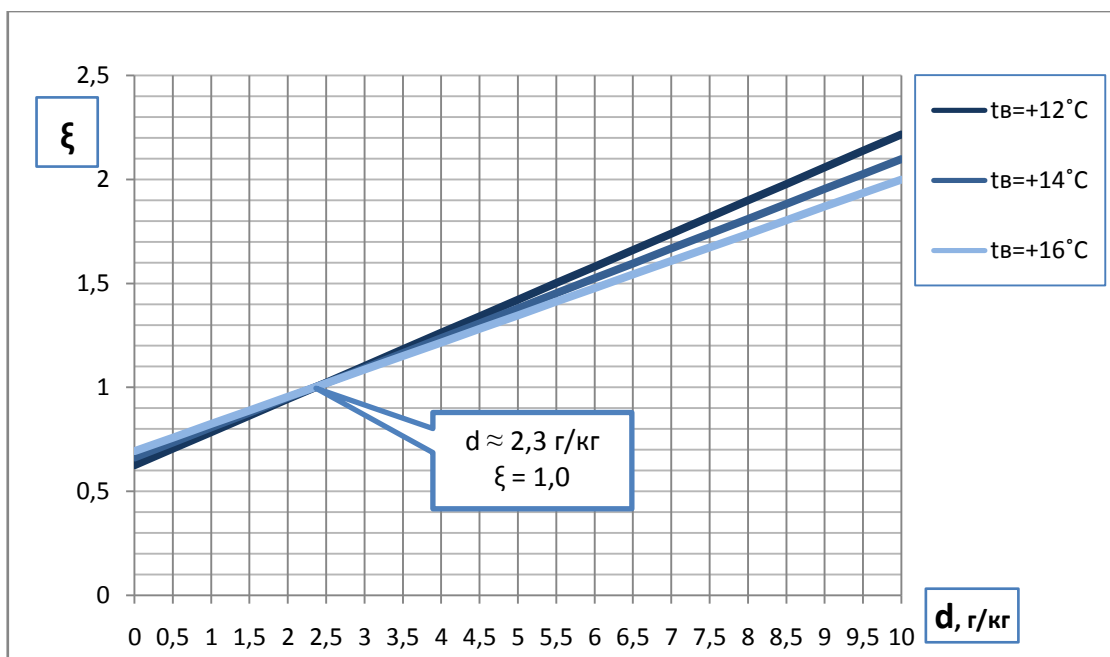


Рис. 3. Зависимость коэффициента влаговываждения от влагосодержания воздуха надо льдом при температуре льда $t_{\text{л}} = -6^\circ\text{C}$, температурах воздуха $t_B = +12, +14, +16^\circ\text{C}$ соответственно

Сегодня на современных ледовых аренах для подготовки льда высокого качества используется вода, прошедшая специальную подготовку, включающую несколько ступеней очистки, умягчение, и другие операции. Что и говорить, сконденсировавшаяся из воздуха влага, содержащая немало различных примесей, серьезно ухудшает качество ледового покрытия.

Заметим, что при влагосодержании воздуха $d_B < d''_{\text{в,л}}$ (рисунок 3) коэффициент влаговываждения $\xi < 1$, что говорит о том, что тепловой поток в результате суммарного теплообмена от воздуха меньше, чем от конвективной теплопередачи. В этом случае упругость водяных паров окружающего воздуха меньше чем в состоянии насыщения у поверхности льда, что является движущей силой процессов сублимации – испарения льда в воздух минуя жидкую фазу. Известно, что для поддержания процесса сублимации требуется подвод энергии [4], которая, очевидно, затрачивается из части конвективного потока тепла. Практически при этом мы можем наблюдать некоторое уменьшение нагрузки на станцию холодоснабжения, однако качество ледового покрытия в этом случае серьезно ухудшается. На практике поверхность льда становится неровной, рыхлой и пористой, как следствие растут затраты на восстановление и подготовку льда.

Учитывая вышеизложенное, можно определить оптимальные параметры воздуха в зале ледового катка с учетом теплофизических процессов в зале.

Для минимизации конденсации водяных паров из воздуха на ледяной поверхности следует стремиться к значениям влагосодержания приближенным к параметрам насыщенного воздуха у поверхности льда. Так для льда с температурой поверхности $t_{\text{л}} = -6^\circ\text{C}$ оптимально было бы поддерживать влажность воздуха на уровне около $d_B = 2,3$ г/кг.

Здесь следует заметить, что привычный нам параметр относительной влажности " φ ", выражаемый в %, для нормирования влажности воздуха на катках является слишком неоднозначным и неинформативным, целесообразней для нормирования параметров влажности и расчетов использовать влагосодержание " d ".

Каждый ледовый вид спорта предъявляет различные функциональные требования к ледовому покрытию, которые зависят в том числе и от теплофизических параметров.

Так для хоккея, керлинга требуется жесткий лед, для фигурного катания предпочтителен более мягкий (более теплый) лед. По данным [5] температура льда в диапазоне $-6,5^{\circ} \div -5,5^{\circ}\text{C}$ удовлетворяет требованиям хоккея, для фигурного катания оптимальной является $-4,0^{\circ} \div -3,0^{\circ}\text{C}$, для массового катания приемлемо $-3,0^{\circ} \div -2,0^{\circ}\text{C}$. Значения влагосодержания воздуха, при которых не происходит конденсация водяных паров из воздуха, также будут соответственно отличаться.

К качеству ледовой поверхности площадок для керлинга предъявляются очень жесткие требования. Оптимальной температурой льда является $-4,5^{\circ}\text{C}$. Специфическая фактура поверхности, которая создается путем намораживания на выровненной поверхности льда специальных пупырышек-«пемблов» может поддерживаться только при сведении к минимуму конденсации водяных паров из воздуха при оптимальной температуре. Так по материалам «ScottishCurling-IceGroup» [6] идеальными условиями на площадке на высоте 1,5 м являются температура воздуха $+8^{\circ}\text{C}$, при влагосодержании около 2,77 г/кг (относительной влажности около 40%). Учитывая, что круглогодичное поддержание таких параметров представляет очень непростую задачу, достаточными условиями для керлинговой площадки могут быть: температура $+8^{\circ}\text{C}$, при влагосодержании около 3,3 г/кг (относительная влажность 50%).

Особые требования ко льду предъявляют конькобежцы. С точки зрения физических свойств, лед должен быть достаточно жестким и (самое важное) иметь как можно более низкий коэффициент трения с коньком. Жесткость достигается охлаждением поверхности до -7°C и ниже.

Механизмы трения на льду на сегодняшний день до конца не изучены. В работе [7] описаны некоторые направления работ по оптимизации различных свойств льда для достижения оптимальных характеристик для конькобежного спорта высоких результатов. По одной из концепций [8] для минимизации трения конька на поверхности льда должна присутствовать тончайшая пленка воды, которая может быть образована конденсацией водяных паров из воздуха. При этом слишком активная конденсация (толстая пленка воды) нежелательна, так как коэффициент трения увеличивается. По результатам опытных данных [9] на льду с температурой -6°C минимальные значения коэффициента трения принимал при $d_v = 2,9 \div 3,4$ г/кг, что несколько выше, чем влагосодержание насыщенного воздуха у поверхности, при котором конденсация не происходит.

Суммарная величина сконденсированной влаги в кг/ч составит:

$$W_{\text{конд}} = w_{\text{конд}} * 10^{-3} * F_{\text{л}} \quad (3)$$

где $w_{\text{конд}}$ - удельное влаговываждение на льду, г/(ч*м²);

$F_{\text{л}}$ - площадь поверхности льда, м².

Количество водяных паров, сконденсировавшихся на поверхности льда приблизительно может быть определено по формуле для удельного массового потока в процессе массообмена, г/(ч*м²):

$$w_{\text{конд}} = \beta * (p_v - p_{v,l}) \quad (4)$$

где p_v - упругость водяного пара при параметрах воздуха в зоне льда;

$p_{v,l}$ - упругость водяного пара воздуха в состоянии насыщения при температуре льда;

P_0 - барометрическое давление воздуха, кПа;

β - коэффициент массообмена, г/(кПа*м²*ч) определяется по формуле [9]:

$$\beta = 18(0,35 + 0,79v_v) \quad (5)$$

где v_B – скорость движения воздуха у поверхности льда, м/с.

Упругость водяного пара можно выразить через влагосодержание:

$$p_B = P_6 * \frac{d_B}{622,1+d_B} \tag{6}$$

Тогда формула (4) будет преобразована к виду:

$$W_{\text{конд}} = \beta * P_6 * \left(\frac{d_B}{622,1+d_B} - \frac{d''_{B,Л}}{622,1+d''_{B,Л}} \right) \tag{7}$$

где d_B - влагосодержание воздуха в зоне льда;
 $d''_{B,Л}$ - влагосодержание воздуха в состоянии насыщения при температуре поверхности льда.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов удельной величины конденсации водяных паров на ледяной поверхности по формуле (7) при расчетной средней подвижности воздуха у поверхности 0,2 м/с для атмосферного давления 101,3 кПа.

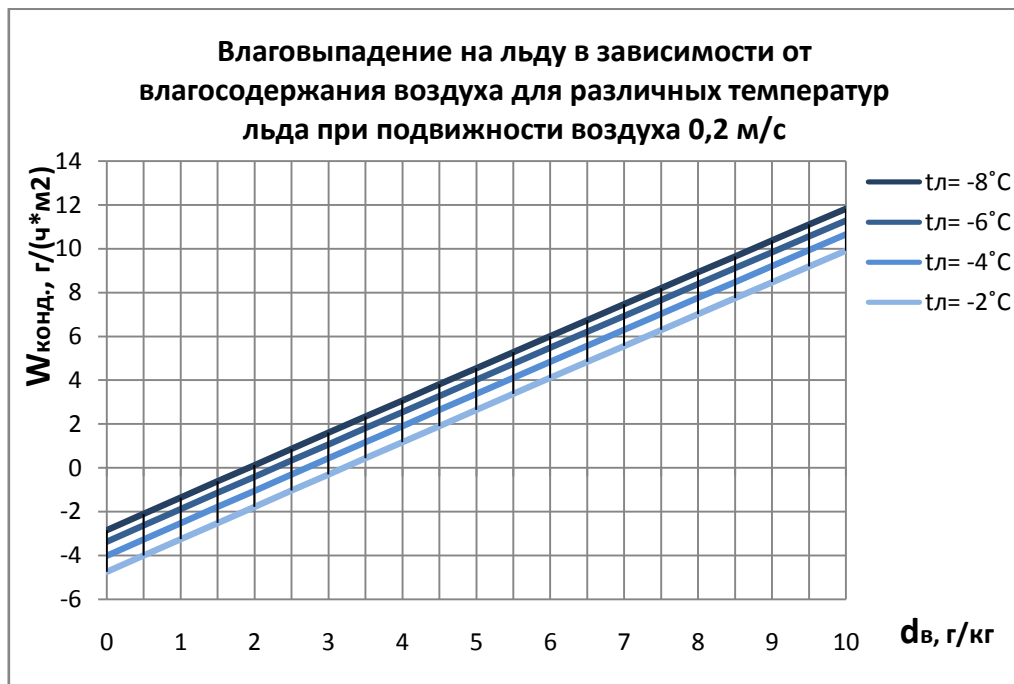


Рис. 4. Удельная величина влаговываждения на льду за счет конденсации водяных паров из воздуха в зависимости от влагосодержания воздуха при различных температурах льда

Нормируемая подвижность воздуха у поверхности льда при проектировании систем вентиляции и кондиционирования не должна превышать 0,25 м/с. Во время спортивных мероприятий за счет движения спортсменов подвижность может увеличиваться в 2 раза и более.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов влаговываждения на льду при различных значениях подвижности воздуха при температуре льда -6°C, также рассчитанные по формуле (7):

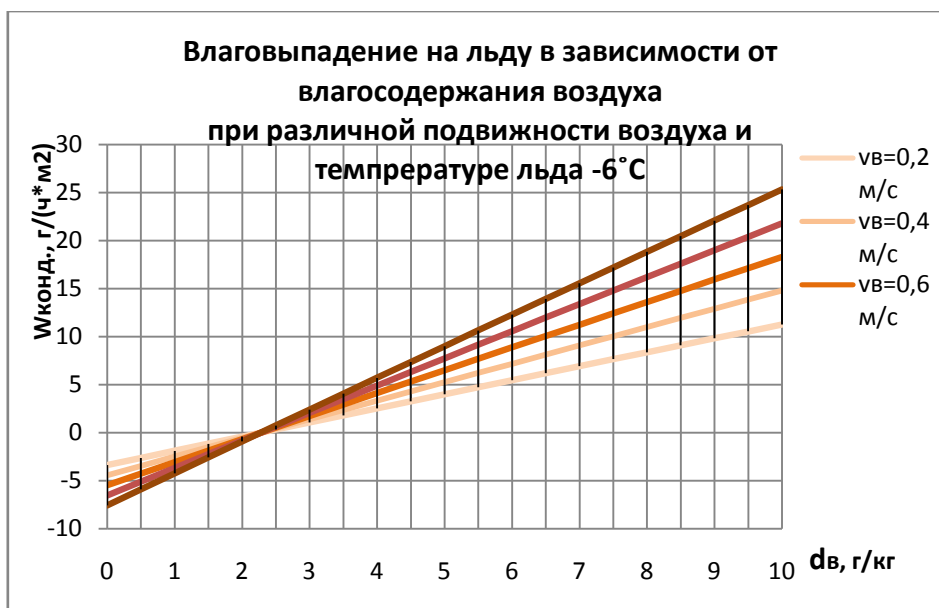


Рис. 5. Удельная величина влаговываждения на льду в зависимости от влагосодержания воздуха при различных значениях подвижности воздуха при температуре поверхности льда -6°C

Заметим, что при $d_{в} < d_{в.л}''$ (влагосодержание воздуха в состоянии насыщения при температуре поверхности льда) величина конденсации паров на льду принимает отрицательные значения (рис.4,5), что говорит о том, что при этих параметрах имеет место сублимация льда.

Чрезвычайно важным при нормировании влажности в помещении ледовых залов, которую должны поддерживать системы кондиционирования воздуха является необходимость учета затрат на реализацию этих требований. Поддержание влажности в узких пределах зачастую требует как дорогостоящего оборудования, так и значительных эксплуатационных расходов. При этом для эффективного регулирования влажности недостаточно надежной работы мощных систем кондиционирования, необходимы также рациональные архитектурные решения при высоком качестве строительных работ, исключающие неорганизованное проникновение в зал объемов влажного воздуха снаружи (известно, что в теплое время года наибольшая величина влагопоступлений происходит с наружным воздухом). Кроме того необходимо строгое выполнение режимов открывания входных проемов, контроль источников влаговывделений внутри зала и целый ряд других мер.

В ряде случаев жесткие идеальные требования лучше смягчить, заменив «идеальные» параметры воздуха для льда на «допустимые», или еще на этапе формирования исходных данных для проектирования, ограничить период поддержания оптимальных параметров несколькими зимними месяцами, когда наружный воздух имеет невысокие параметры абсолютной влажности.

Так принятие в качестве расчетных параметров воздушной среды в зоне ледовой площадки рекомендованных значений из [10]: относительной влажности $\varphi_{e}=55\%$ при температуре $t_{e}=14^{\circ}\text{C}$, что соответствует влагосодержанию $d_{e}\approx 5,4$ г/кг, позволяют получить приемлемое качество ледового покрытия для хоккея с шайбой или фигурного катания при умеренных затратах для обеспечения этих параметров. Показательно, что приведенные значения являются исходными в большинстве проектов инженерное обеспечение ледовых залов, выпускаемых сегодня подрядными организациями.

Список литературы

1. *Русаков С.В.* К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков. Нагрузка от радиационного переноса теплоты // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. №1.

2. Лихтенштейн Э.Л., Астапов Э.А., Беккергун А.Л., и др. Рекомендации по проектированию инженерного оборудования искусственных катков // Л. 1972.
3. Различные области применения холода // под ред. А.В. Быкова - М.: Агропромиздат. 1985.-272с
4. Богданов С.Н., Бучко Н.А, Гуйго Э.Й. и др. Теоретические основы хладотехники. Часть 2. Тепломассообмен // М: Колос. 1994. -368с.
5. ASHRAE 2014 / Refrigeration Handbook, ch.44. Ice Rinks.
6. Scottish Curling-Ice Group / Water in a Curling Rink. 2006.[Электронный ресурс]:<http://www.scottishcurlingicegroup.org/reports.php>
7. Публикации ХИЦ. Сверхбыстрый лед: иллюзии и реальность.[Электронный ресурс]:http://ice4sport.com/publikcii_n/article_post/sverhbystryy-lyod-illyuzii-i-realnost
8. Патент RU 3 416 058 C1. РФ. Способ формирования массива льда в закрытых помещениях // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 2011.
9. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС. В 2 томах. Том 2.// СПб.: 2013.- 430 с.
10. СП 31-112-2007.Свод правил по проектированию и строительству. Физкультурно-спортивные залы. Часть 3. Крытые ледовые арены.

References

1. Rusakov S.V. К расchetу teplovykh i vlazhnostnykh nagruzok ledovykh katrov. Nagruzka ot radiatsionnogo perenosa teploty // Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie». 2014. №1.
2. Likhtenshtein E.L., Astapov E.A., Bekkergun A.L., i dr. Rekomendatsii po proektirovaniyu inzhenernogo oborudovaniya iskusstvennykh katrov // L. 1972.
3. Razlichnye oblasti primeneniya kholoda // pod red. A.V. Bykova - M.: Agropromizdat. 1985.-272s
4. Bogdanov S.N., Buchko N.A, Guigo E.I. i dr. Teoreticheskie osnovy khladotekhniki. Chast' 2. Teplomassoobmen // M: Kolos. 1994. -368s.
5. ASHRAE 2014 / Refrigeration Handbook, ch.44. Ice Rinks.
6. Scottish Curling-Ice Group / Water in a Curling Rink. 2006.[Elektronnyi resurs]:<http://www.scottishcurlingicegroup.org/reports.php>
7. Publikatsii KhITs. Sverkhbystryi led: illyuzii i real'nost'. [Elektronnyi resurs]:http://ice4sport.com/publikcii_n/article_post/sverhbystryy-lyod-illyuzii-i-realnost
8. Patent RU 3 416 058 C1. RF. Sposob formirovaniya massiva l'da v zakrytykh pomeshcheniyakh // Federal'naya sluzhba po intellektual'noi sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. 2011.
9. Sotnikov A.G. Proektirovanie i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukhha. Polnyi kompleks trebovaniy, iskhodnykh dannykh i raschetnoi informatsii dlya SO, SPV, SKV, SGVS i SKhS. V 2 tomakh. Tom 2.// SPb.: 2013.- 430 s.
10. SP 31-112-2007.Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. Fizkul'turno-sportivnye zaly. Chast' 3. Krytye ledovye areny.