

УДК 536.24, УДК 628.84

К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков Нагрузка от радиационного переноса теплоты

Русаков С.В. rsvit@mail.ru

Технический директор ЗАО «Балтийская Климатическая Компания»

Работа посвящена расчетам тепловых нагрузок ледового катка, в частности нагрузок от радиационного теплопереноса.

В 1 части приводится методика расчета лучистых теплопритоков от окружающих поверхностей для катков в закрытых помещениях. Проводится сравнение приведенной методики с методикой из справочника [7], широко применяемой сегодня среди инженеров. Приводятся способы снижения нагрузки от лучистого теплопереноса путем применения отражающих экранов и специальных материалов для потолка.

Во 2 части рассматривается задача из области кондиционирования воздуха по определению параметров воздушной среды в зале крытого катка, при которых возможно образование конденсата на поверхностях, охлажденных за счет радиационного теплопереноса. Приводятся расчеты для залов ледовых арен трех размеров – тренировочного катка, ледовой арены с трибунами на 3000 зрителей, крупной ледовой арены с трибунами на 15000 мест.

В 3 части рассматриваются закономерности теплопереноса от солнечной радиации на ледовую поверхность катка под открытым небом.

Приводится расчет коэффициентов поглощения солнечной радиации для совокупности видимого и инфракрасного диапазонов солнечного спектра.

В 4 части приводится методика расчета теплопритоков от искусственного освещения, подчиняющихся законам радиационного теплопереноса. Рассматриваются современные осветительные приборы.

Материалы, представленные в работе, могут быть интересны инженерам, проектирующим искусственные ледовые катки, а также тем, кто интересуется вопросами радиационного теплопереноса.

Ключевые слова: расчет ледовых катков, лучистый теплоперенос на ледовых катках, кондиционирование воздуха ледовых катков.

To calculation of thermal and moist loadings ice skating rinks Loading from radiant heat transfer

S. Rusakov rsvit@mail.ru

Technical Director JSC «Baltic Climate Company»

Work is devoted to calculations of thermal loadings of an ice skating rink, in particular loadings from radiant heat transfer.

The method of calculation of radiant heat transfer rate is given in 1 part from

surrounding surfaces for skating rinks in the closed rooms. Comparison of the given technique with a technique from the directory [7], widely applied among engineers is carried out today. Ways of decrease in loading from athermal radiation by use of reflecting screens and special materials for a ceiling are given.

In 2 parts the task from air conditioning area by determination of parameters of the air environment in a hall of a covered skating rink at which formation of condensate on the surfaces cooled at the expense of athermal radiation is possible is considered. Calculations for halls of ice arenas of three sizes – a training skating rink, the ice arena with tribunes on 3000 viewers, the large ice arena with tribunes on 15000 places are given.

In 3 parts regularities of heattransfer from solar radiation on an ice surface of a skating rink open-air are considered.

Calculation of coefficients of absorption of solar radiation for set of visible and infrared ranges of a solar range is given.

The method of calculation of a heat transfer rate is given to 4 parts from the artificial lighting, submitting to laws of thermal radiation. Modern illuminants are considered.

Keywords: calculation of ice skating rinks, radiant heattransfer on ice skating rinks, air conditioning of ice skating rinks.

Часть 1

За последние годы в России спроектировано, построено и введено в эксплуатацию немало новых объектов с искусственным льдом. Только в Санкт-Петербурге за 15 лет появилось не менее 25 ледовых катков в закрытых помещениях. Профиль площадок самый разнообразный – от спортивных арен различного уровня и назначения до развлекательных.

Вместе с тем, сегодня проектировщик инженерных систем для таких объектов сталкивается с дефицитом информации и методик, дающих возможность принять оптимальные технические решения и произвести подбор основного оборудования.

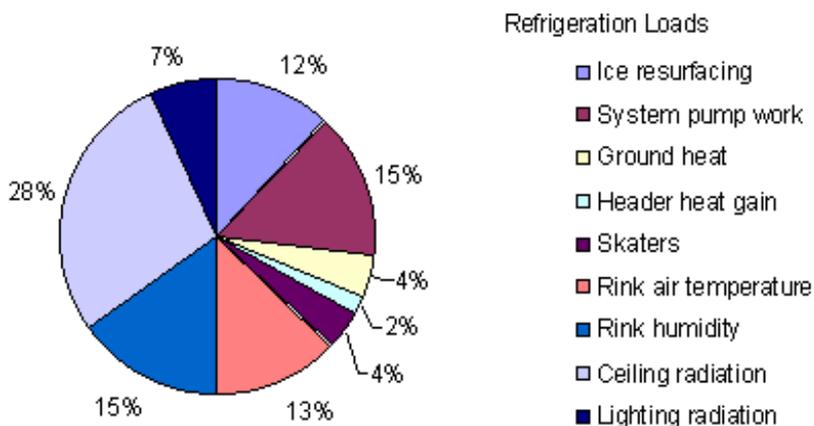
Мощность холодильного оборудования для поддержания льда на площадке выбирается по результатам расчетов теплопритоков.

По данным [9,11] состав и распределение различных составляющих теплопритоков для катков в закрытых помещениях следующие:

Как видим, радиационная составляющая теплопритоков от потолка и конструкций, окружающих ледовую площадку является наиболее значимой.

У отечественных инженеров широкое применение получила методика, приведенная в справочнике [4,7].

Холодильная нагрузка



- обработка льда
- работа насосов системы
- теплопередача из грунта
- теплопритоки через коллектор и магистрали
- катающиеся
- от температуры воздуха
- от влажности воздуха
- радиация от потолка
- радиация от освещения

В соответствии с ней, плотность теплового потокуличистого переноса теплоты к поверхности льда от трибун со зрителями и строительных конструкций в закрытых залах определяется по формуле:

$$q_{\text{луч}} = c_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{огр}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{л}}}{100} \right)^4 \right] \tag{1}$$

Где $T_{\text{л}}$ - температура поверхности льда,

$T_{\text{огр}}$ - средневзвешенная абсолютная температура поверхностей ограждений, окружающих каток (может быть принята равной абсолютной температуре воздуха в объеме зала катка $T_{\text{в}}$),

$c_{np} \approx 5,67A$ - приведенный коэффициент излучения системы лед- окружающие поверхности определяется коэффициентом излучения поверхности льда , $A = 0,5$ - коэффициент поглощения слоя льда на охлаждающей плите [7], соответствует светлой поверхности бетонной плиты и достаточной чистоте воды, из которой готовят ледяной покров катка. Окончательно в [7] .:

$$q_{луч} = 2,835 \left[\left(\frac{T_{огр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{л}}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

Рассмотрим обоснованность применения коэффициента $A = 0,5$ на примере теплопередачи излучением к ледовой площадке от окружающих поверхностей в закрытом зале ледового катка.

В случае, когда составляющие величины теплового баланса системы ледовая поверхность- зал постоянны во времени, имеет место установившийся процесс теплопередачи излучением лед-окружающие поверхности. Согласно уравнению Стефана-Больцмана поглощение тепловой энергии ледовой поверхностью составляет:

$$Q_{л} = F_{л} c_0 A_{л} \times \left(\frac{T_{л}}{100} \right)^4 \quad (3)$$

Соответственно для окружающих поверхностей:

$$Q_{огр} = F_{огр} c_0 A_{огр} \times \left(\frac{T_{огр}}{100} \right)^4 \quad (4)$$

В формулах $F_{л} A_{л}$, $F_{огр} A_{огр}$ - площади и коэффициенты поглощения ледовой поверхности и ограждений.

Для системы лед- окружающие поверхности: $Q_{л} = Q_{огр}$

Для стационарного состояния системы, когда величина теплового потока не изменяется во времени, соблюдается равенство [6] : $A_{л} = \varepsilon_{л}$, $A_{огр} = \varepsilon_{огр}$.

Результирующий поток радиационного тепла:

$$Q_{л-огр} = c_{пр.л-огр} F_l \left[\left(\frac{T_{огр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_l}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Приведенный коэффициент излучения

$$c_{пр.л-огр} = c_0 \varepsilon_{пр} \quad (6)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Приведенная степень черноты в системе:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_l} + \frac{F_l}{F_{огр}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{огр}} - 1 \right)} \quad (7)$$

Расчетная схема для определения показателей радиационного обмена соответствует варианту [6], когда поверхность с усредненным показателем $\varepsilon_{огр}$ (ограждающие поверхности) образует совместно с другой, имеющей показатель ε_l (лед), замкнутый объем.

Степень поглощения электромагнитных волн различными веществами зависит от длины волны излучения. В соответствии с законом Вина длина волны максимума плотности теплового потока:

$$\lambda_{\text{макс}} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Для условий катка при температуре $+15^\circ\text{C}$ (288К) : $\lambda_{\text{макс}} \approx 1,0 \cdot 10^{-5}$ м. находится в дальней инфракрасной области, основная часть плотности распределяется в диапазоне длин волн $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-6} \div 4,0 \cdot 10^{-5}$.

Характеристики радиационного излучения водного льда в этом диапазоне близки к характеристикам абсолютно черного тела, степень черноты составляет [3]: $\varepsilon_l = 0,96 - 0,98$

Инфракрасное электромагнитное излучение взаимодействует с веществом в тонком верхнем слое, и результирующий эффект для льда никак не зависит ни от чистоты воды, из которой он сделан, ни от цвета бетонной плиты, на которой он заморожен.

Таким образом расчет лучистой составляющей тепловой нагрузки на лед сводится к определению его коэффициента поглощения, который можно найти, зная степень черноты льда $\varepsilon_{\text{л}}$ и интегральную степень черноты окружающих поверхностей $\varepsilon_{\text{огр}}$.

Окружающие поверхности в основном состоят из материалов, значения степени черноты которых широко представлены в справочной литературе и укладываются в диапазон $\varepsilon_{\text{огр1}} = 0,86 - 0,96$ с возможным незначительным включением металлических поверхностей с $\varepsilon_{\text{огр2}} = 0,05 - 0,25$.

Для рассматриваемых условий средневзвешенный показатель для ограждающих поверхностей можно принять $\varepsilon_{\text{огр}} = 0,9$.

В качестве примера произведем расчет для варианта **тренировочного катка** размерами зала в плане 66*39м, высотой до потолка 9 м, с ледовой площадкой стандартного размера для хоккея с шайбой 60*30м (см. рис.1). Температура воздуха в зале +15°C, температура льда -5°C.

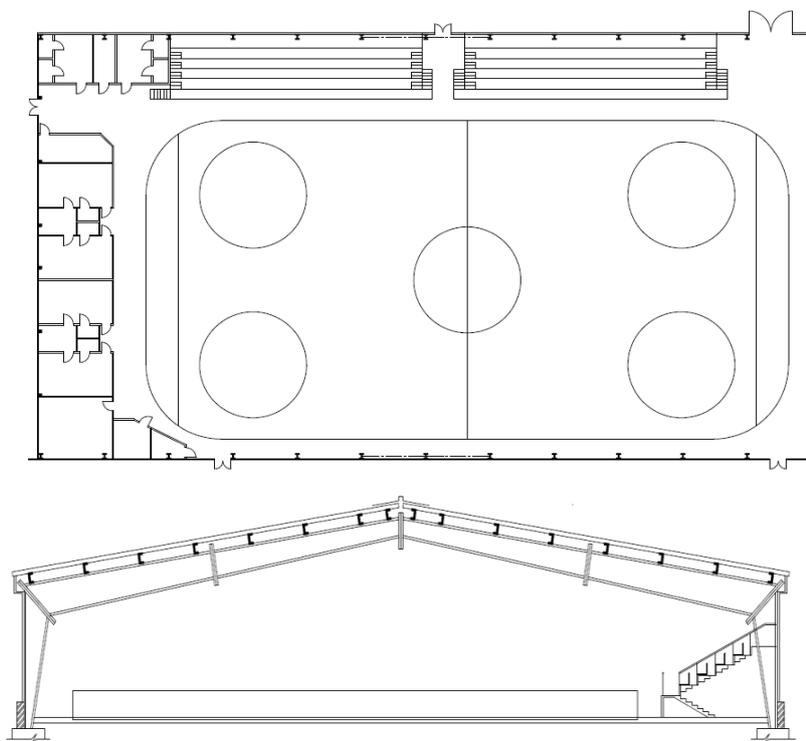


Рис.1 План и разрез зала тренировочного катка с трибунами на 200 зрителей

Приведенный коэффициент излучения в системе лед-окружающие поверхности по формуле (6) составит:

$$c_{np.l-огр} = c_0 \varepsilon_{np} = c_0 \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_l} + \frac{F_l}{\Sigma F_{огр}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{огр}} - 1 \right)} = 5,67 \frac{1}{\frac{1}{0,97} + \frac{1800}{4464} \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right)} =$$

$$\approx 5,67 \cdot 0,93 = 5,273 \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$$

Плотность лучистого теплового потока ко льду по формуле(1):

$$q_{огр-л} = 5,273 \cdot \left[\left(\frac{288}{100} \right)^4 - \left(\frac{268}{100} \right)^4 \right] = 90,7 \text{Вт}/\text{м}^2$$

Рассчитанный коэффициент излучения значительно (в 1,86 раза) отличается от предлагаемого в методике [7] (соответственно $c_0 A_{np} = c_0 \varepsilon_{np} = 2,835 \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$), в той же степени заниженными получаются результаты расчета радиационной составляющей теплопритоков к ледовой поверхности крытого катка.

По аналогии с [7] ниже представлен график для определения $q_{луч}$, рассчитанной по (1) для приведенного коэффициента поглощения $A_{np} = \varepsilon_{np} = 0,93$:

$$q_{луч} = 5,273 \cdot \left[\left(\frac{T_{Rогр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_l}{100} \right)^4 \right] \tag{9}$$

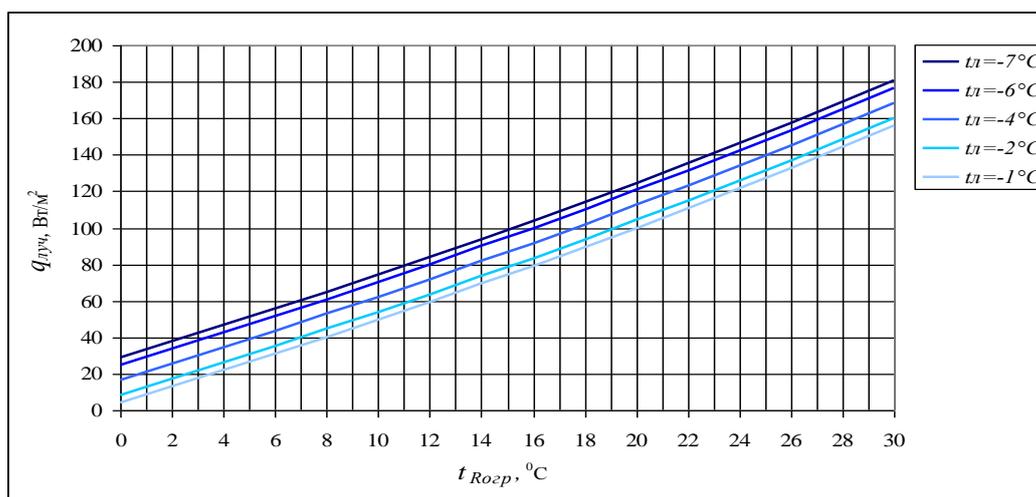


Рис.2 Изменение плотности радиационного теплового потока на лед от окружающих поверхностей $q_{\text{луч}}$ в зависимости от средней радиационной температуры поверхностей $t_{\text{Розр}}$ для разных температур льда $t_{\text{л}}$.

Формула (9) справедлива для случая, когда окружающие лед поверхности имеют сходные показатели излучения $\varepsilon_{\text{озр}1} \approx \varepsilon_{\text{озр}2} \approx \dots \approx \varepsilon_{\text{озр}i} \approx 0,90$

Для предварительных расчетов можно принять $t_{\text{Розр}} \approx t_{\text{в}}$, где $t_{\text{в}}$ - температура воздуха в зале.

Для точных расчетов дополнительно следует учесть уменьшение фактической температуры поверхности потолка за счет лучистого охлаждения льдом, о чем будет изложено ниже.

Одним из наиболее эффективных способов снижения нагрузки от теплового излучения является **применение экранов**.

В простейшем случае расчетной схемы теплообмена между двумя параллельными бесконечными поверхностями с одинаковыми коэффициентами излучения, установка между ними экрана с таким же коэффициентом, снижает количество передаваемой теплоты вдвое [6].

Если экран имеет меньший коэффициент излучения, то тепловой поток может быть

уменьшен в
$$\frac{q_{n-n}}{q_{n-э}} = 2 \times \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_э}$$
 раз

$\varepsilon_э, \varepsilon_n$ - коэффициенты черноты материалов экрана и поверхности.

Так для двух бесконечных поверхностей с $\varepsilon_{\text{озр}} = 0,9$ после введения экрана из алюминиевой фольги с $\varepsilon_э = 0,055$ интенсивность излучения уменьшится в

$$\frac{q_{n-n}}{q_{n-э}} = 2 \times \frac{0,9}{0,055} = 33 \text{ раза.}$$

На практике для уменьшения излучения потолка применяют экраны на основе металлизированных полимерных пленок или фольгированных материалов.



Рис.3 Пример установки отражающего экрана под потолком катка.

Для расчета суммарного излучения от поверхностей, имеющих различные характеристики излучения, вводится коэффициент облученности φ , показывающей долю лучистого потока, попадающего на ограниченную поверхность от другой поверхности с учетом взаимного расположения.

В общем случае для 2 плоских поверхностей площадью F_1 и F_2 , находящихся на расстоянии Z друг от друга под углами одна к другой β_1 и β_2 :

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi \cdot Z^2} dF_1 dF_2 \quad (9)$$

Для основных случаев взаимного расположения поверхностей для определения коэффициентов облученности имеются расчетные номограммы [1].

При этом должно соблюдаться свойство замкнутости лучистых потоков:

$$\sum \varphi_{l-1+i} = 1 \quad (10)$$

Для поверхности льда падающий лучистый тепловой поток складывается из потока от экрана, занимающего поверхность потолка и от остальных окружающих поверхностей – вертикальных строительных ограждений:

$$q_{л.луч\Sigma} = q_{э-л} + q_{огр.в-л} \quad (11)$$

Плотность потока от экрана по формулам (6),(7) с учетом коэффициента облученности:

$$q_{э-л} = c_0 \varepsilon_э \varphi_{л-э} \left[\left(\frac{T_э}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_л}{100} \right)^4 \right] \quad (12)$$

Считаем, что $t_э \approx t_г$,

Для отражающей стороны экрана, обращенной ко льду $\varepsilon_э \approx 0,10$

По номограммам [1]: $\varphi_{л-э} = 0,66 + 0,057 + 0,027 + 0,011 + 0,011 \approx 0,77$

$$q_{э-л} = 5,67 \cdot 0,10 \cdot 0,77 \cdot \left[\left(\frac{288}{100} \right)^4 - \left(\frac{268}{100} \right)^4 \right] \approx 7,5 \text{ Вт/м}^2$$

Суммарный коэффициент облученности льда вертикальными ограждениями $\varphi_{\Sigma} \approx 0,23$

$$q_{огр.в-л} = 5,67 \cdot 0,90 \cdot 0,23 \cdot \left[\left(\frac{288}{100} \right)^4 - \left(\frac{268}{100} \right)^4 \right] \approx 20,2 \text{ Вт/м}^2$$

В сумме для ледовой поверхности получаем $q_{луч\Sigma} = q_{л-э} + q_{л-огр.в} = 27,7 \text{ Вт/м}^2$
 Таким образом, для расчетного примера применение отражающего экрана позволило сократить величину лучистой составляющей нагрузки на лед в 3,27 раза.

График, построенный по результатам расчетов плотности радиационного теплового потока для экранированной поверхности потолка:

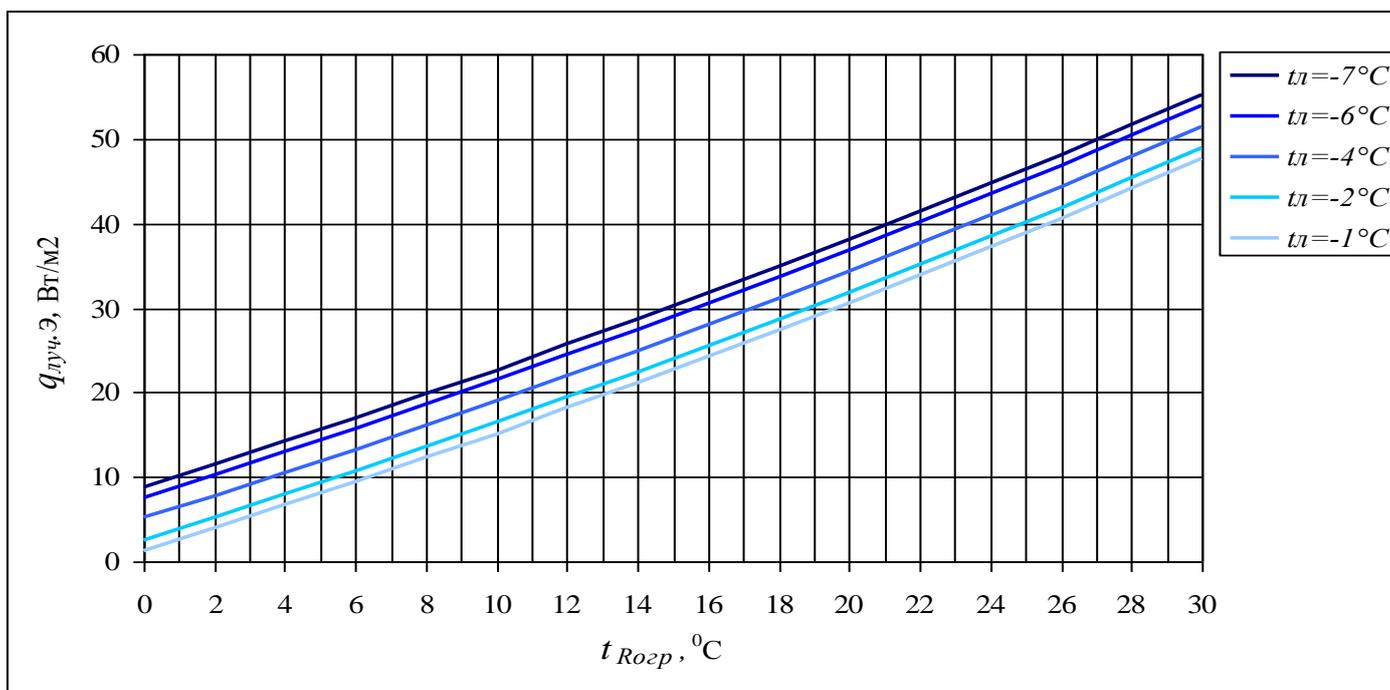


Рис.4 Изменение плотности радиационного теплового потока на лед тренировочного катка $q_{луч,э}$ от ограждающих конструкций с установленным экраном на всей площади потолка, с характеристиками излучения $\varepsilon_s \approx 0,10$ в зависимости от средней радиационной температуры поверхностей t_{Roep} для разных температур льда $t_{л}$.

В качестве материала поверхности потолка часто применяется стальной оцинкованный профилированный лист. Для этого материала степень черноты составляет $\varepsilon_n \approx 0,28$ [1].



Рис.5 Пример применения профилированного стального оцинкованного листа в качестве материала потолка в зале катка.

Для плотности лучистого теплового потока на лед от потолка и от вертикальных строительных ограждений, если они имеют различные характеристики излучения, но одинаковую радиационную температуру t_{Rozp} формулу (11) можно записать в виде:

$$q_{л.луч\Sigma} = c_0 (\varepsilon_n \varphi_{л-n} + \varepsilon_{огр} \varphi_{л-огр}) \left[\left(\frac{T_{Rozp}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{л}}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Для потолка из оцинкованного стального листа при температуре $t_{Rozp} = +15^\circ\text{C}$, температуре льда $t_{л} = -5^\circ\text{C}$, кроме того (рис.5), учитываем, что около 20% площади потолка занимают несущие и навесные конструкции (балки, обходные мостки и пр.), выкрашенные красками с $\varepsilon_n \approx 0,81$ [1]:

$$q_{л.луч\Sigma} = 5,67(0,28 \cdot 0,77 \cdot 0,8 + 0,81 \cdot 0,77 \cdot 0,2 + 0,9 \cdot 0,23) \left[\left(\frac{288}{100} \right)^4 - \left(\frac{268}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 49,20 \text{ Вт/м}^2$$

Уменьшение величины лучистой составляющей нагрузки на лед за счет применения оцинкованной стали в качестве материала потолка составляет 1,84 раза по сравнению с исходным примером.

График, построенный по результатам расчетов плотности радиационного теплового потока для рассматриваемого конструктивного исполнения потолка:

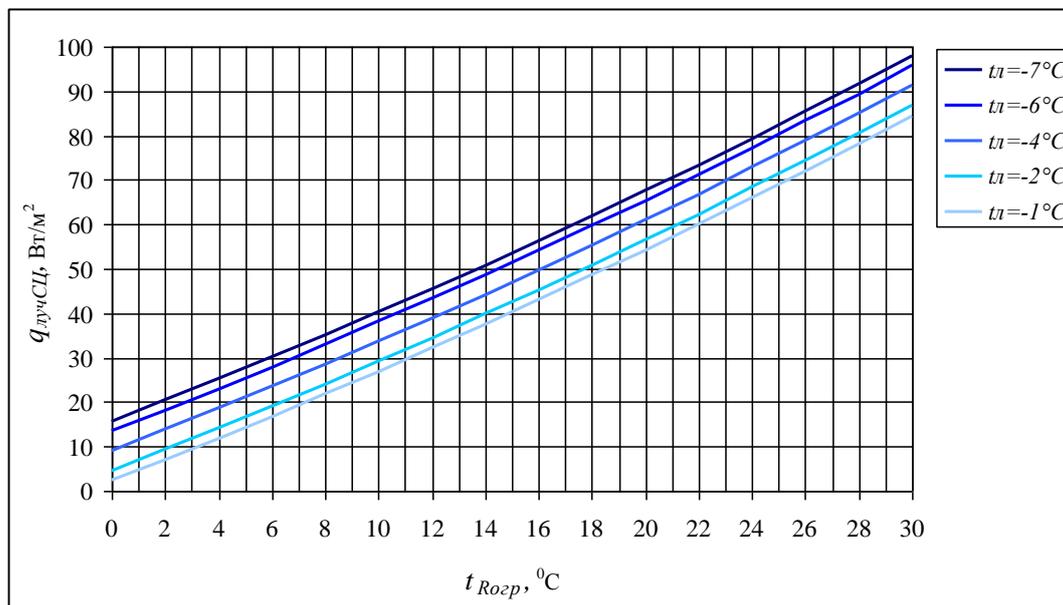


Рис.6 Изменение плотности радиационного теплового потока на лед тренировочного катка $q_{луч}, Вт/м^2$ от ограждающих конструкций с потолком из профилированной оцинкованной стали с характеристиками излучения $\epsilon_s \approx 0,28$ с учетом несущих и подвесных конструкций, в зависимости от средней радиационной температуры поверхностей t_{Royp} для разных температур льда t_l .

Часть 2

Для задач кондиционирования воздуха залов катков и ледовых арен применим этот же подход к расчету радиационной составляющей тепловой нагрузки катка.

Теперь лучистая нагрузка от ледовой поверхности рассматривается по отношению к внутренним ограждениям катка и является исходной для выбора оборудования систем кондиционирования.

При этом принято считать, что лучистые потери тепла относятся к внутреннему объему зала, воспринимаются внутренним воздухом, а также другими поверхностями, и не выходят за пределы зала.

В кондиционировании воздуха крытых ледовых катков приходится решать задачу **предотвращения образования конденсата** на внутренних поверхностях ограждений зала. Чаще всего конденсат образуется **на нижней поверхности конструкций потолка**, обращенных к ледовой поверхности.

Действительно, температура поверхностей, подвергающихся лучистому охлаждению, может снизиться до температуры точки росы воздуха в зале.

Для конструкции потолка соблюдается тепловой баланс:

$$q_{\text{луч.н-л}} = q_{\text{луч.с-н}} + q_{\text{кон}} + q_{\text{м.н}}, \quad (14)$$

где плотность лучистого теплового потока от потолка на лед:

$$q_{\text{н-л}} = c_0 \varepsilon_{\text{н-л}} \varphi_{\text{н-л}} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_l}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

Плотность лучистого теплового потока от стен к потолку:

$$q_{\text{луч.с-н}} = c_0 \varepsilon_{\text{с-н}} \varphi_{\text{с-н}} \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \quad (16)$$

Плотность теплового потока конвективной теплоотдачивоздух-потолок:

$$q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}} (t_s - t_n) \quad (17)$$

где $\alpha_{\text{кон}}$ -коэффициент конвективной теплоотдачи от потолка.

Теплопередача через конструкцию покрытия- наружу:

$$q_{\text{м.н}} = K_{\text{мн}} \cdot (t_s - t_n) \quad (18)$$

$K_{\text{мн}}$ - коэффициент теплопередачи конструкции перекрытия.

T_n, t_n - температура поверхности потолка,

T_s, t_s - температура воздуха в помещении,

t_n - температура наружного воздуха,

Точное решение уравнений (14)-(18) относительно температуры поверхности потолка t_n требует громоздких вычислений.

Решим задачу приближенными методами, приняв дополнительныеупрощения.Так плотность лучистого теплового потока можно выразить через коэффициент теплопередачи и разницу температур в °С [1],для системы потолок- лед :

$$q_{\text{н-л}} = \alpha_{\text{луч.н-л}} \cdot (t_n - t_l) \quad (19)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{луч.н-л}} = c_0 \varepsilon_{\text{н-л}} \varphi_{\text{н-л}} b_{\text{н-л}} \quad (20)$$

b_{n-l} - температурный коэффициент, учитывающий аппроксимацию разностей абсолютных температур в четвертой степени к температуре в °С:

$$b_{n-l} = 0,81 + 0,005(t_n + t_l)$$

(21)

Аналогично плотность лучистого теплового потока для системы (стены+ участки пола, не занятые льдом)–потолок, температура стен равна температуре воздуха $t_c \approx t_g$:

$$q_{c-n} = \alpha_{луч.c-n} \cdot (t_g - t_n) \tag{22}$$

где $\alpha_{луч.c-n} = c_0 \varepsilon_{c-n} \varphi_{c-n} b_{c-n}$ (23)

В формуле (17) для конвективной теплоотдачи от потолка в воздух, коэффициент можно рассчитать по [1], для естественной конвекции на горизонтальной охлажденной поверхности, обращенной вниз:

$$\alpha_{кон} = 2,26 \cdot \sqrt[3]{t_g - t_n} \tag{24}$$

Для расчета, целью которого является определение опасных режимов охлаждения потолка ниже температуры точки росы воздуха, примем: $t_g = t_n$

Тогда теплопередача через конструкцию $q_{m.n} = 0$.

Уравнение (14) для теплового баланса потолка с учетом принятых упрощений:

$$\alpha_{луч.n-l} \cdot (t_n - t_l) = \alpha_{луч.c-n} \cdot (t_g - t_n) + \alpha_{кон} \cdot (t_g - t_n) \tag{25}$$

В формулах (20,23,44) приведенные коэффициенты степени черноты:

потолок - лед $\varepsilon_{n-l} = 0,93$, стены - потолок $\varepsilon_{cm-n} = 0,90$.

Коэффициенты облученности потолка поверхностями[1]:

лед-потолок $\varphi_{n-l} = 0,66$, стены - потолок $\varphi_{cm-n} = 0,34$.

По формулам (17-25) проведены расчеты результирующей температуры поверхности потолка t_n , при разных значениях температуры воздуха в зале тренировочного катка (рис.1), по величине степени охлаждения потолка $t_g - t_n$ определены значения относительной влажности воздуха в зале ϕ_g , при которых будет наблюдаться выпадение конденсата. Результаты расчетов отражены в таблице:

t_g , °С	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
t_n , °С	3,48	4,88	6,28	7,69	9,13	10,54	11,97

$t_g - t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	4,52	5,12	5,72	6,31	6,89	7,46	8,03
критическая $\phi_g, \%$	73,1	70,5	68,0	65,7	63,7	61,7	59,9

Аналогичные расчеты выполнены для зала ледовой арены вместимостью 3000 зрителей размерами в плане 84*46 м., средней высотой 16 м. (см. рис.3).

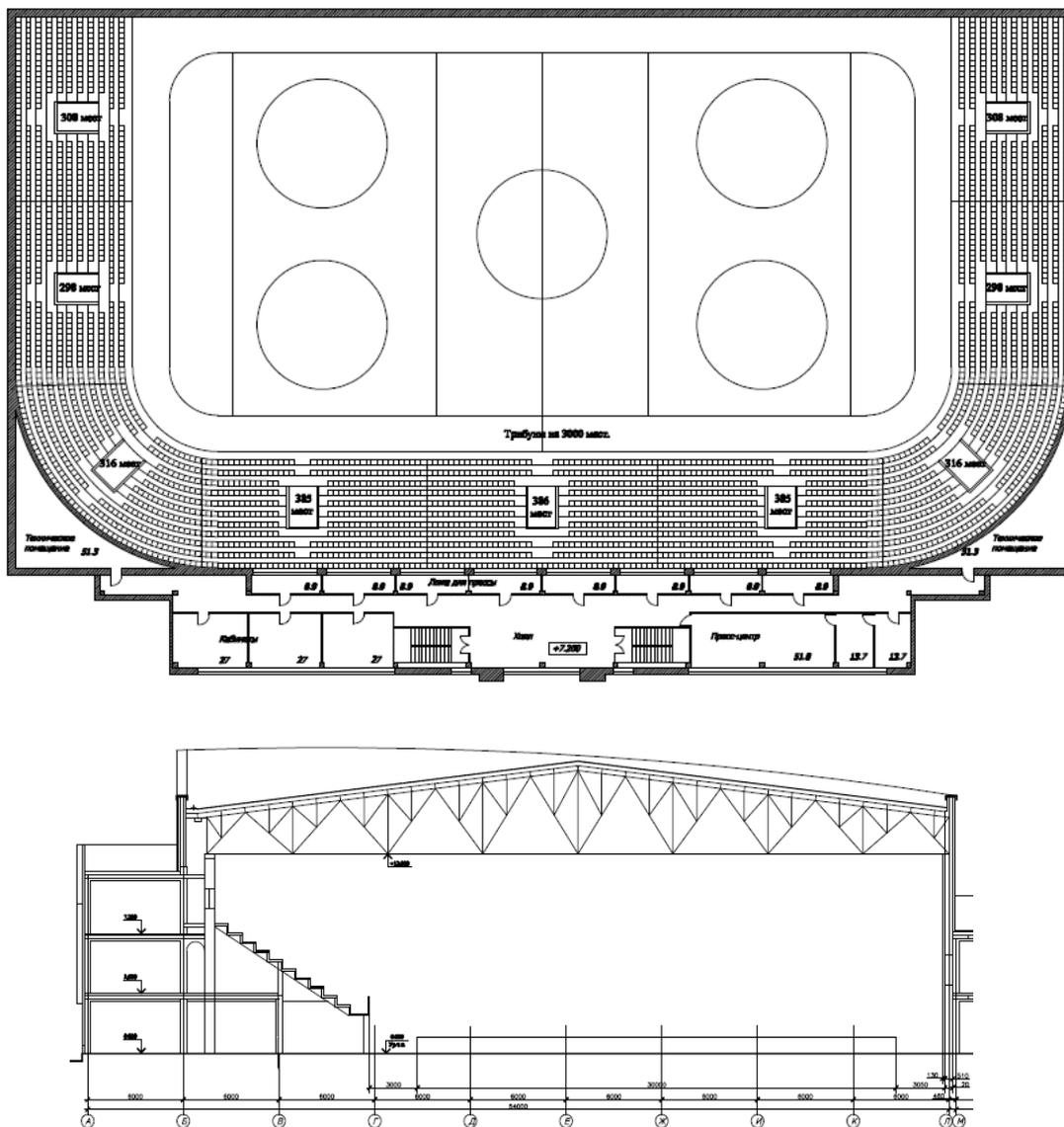


Рис.7 План и разрез зала ледовой арены с трибунами на 3000 зрителей

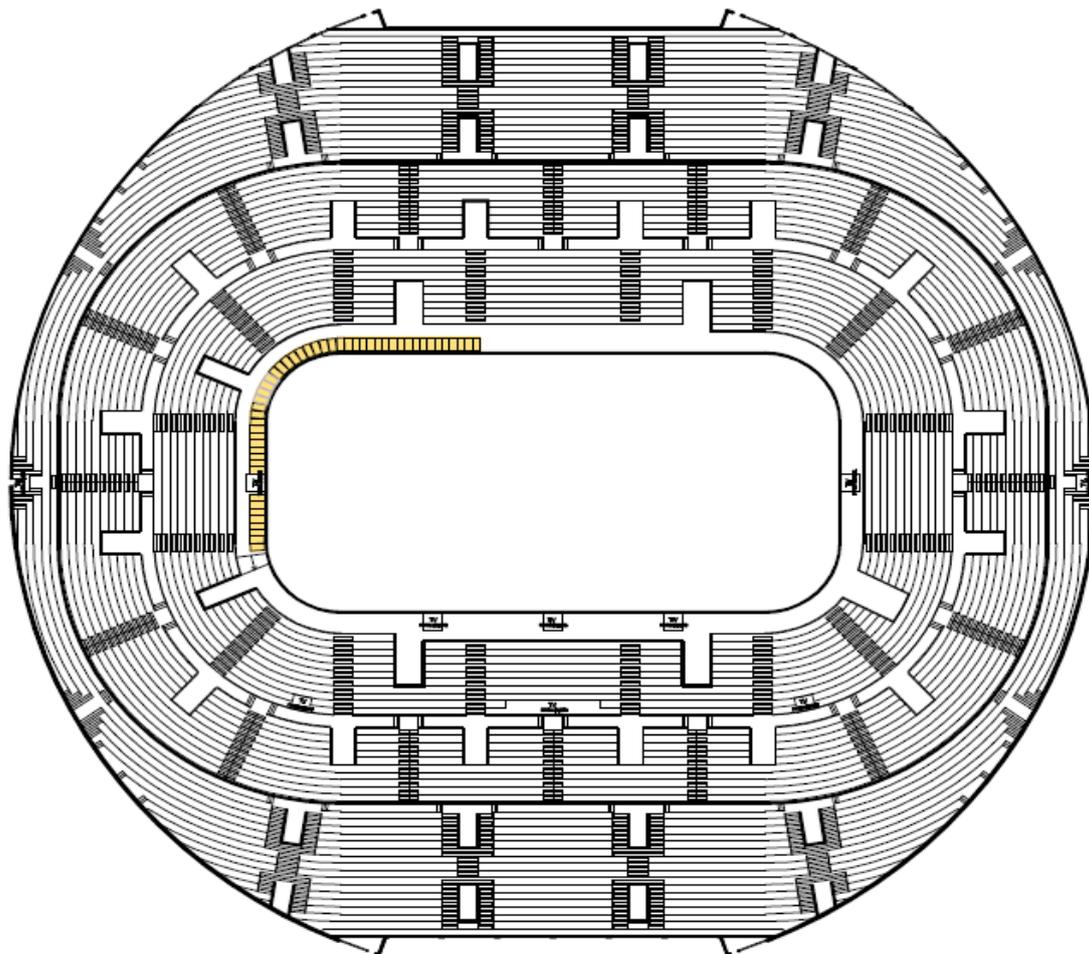
Для геометрических размеров зала коэффициенты облученности:

лед-потолок $\varphi_{n-l} = 0,49$, стены - потолок $\varphi_{cm-n} = 0,51$.

Результаты расчетов представлены в таблице:

$t_g, ^\circ\text{C}$	+12	+14	+16	+18	+20	+22	+24
$t_n, ^\circ\text{C}$	7,56	9,10	10,65	12,20	13,76	15,32	16,89
$t_g - t_n, ^\circ\text{C}$	4,44	4,90	5,35	5,80	6,24	6,68	7,11
критическая $\phi_\phi, \%$	74,2	72,3	70,5	68,9	67,3	65,8	64,5

Серия расчетов была проведена и для **крупного зала вместимостью 15000 зрителей** (см. рис.4), размером около 112 м.в диаметре, средней высотой 32 м.от уровня ледовой поверхности.



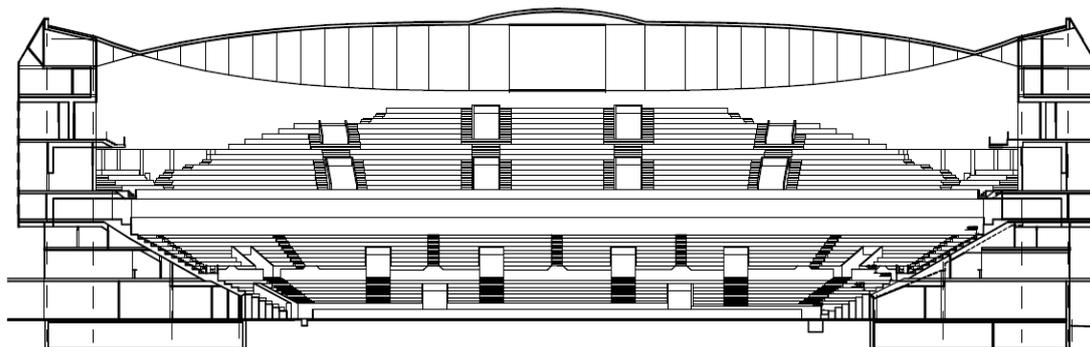


Рис.8 План и разрез зала ледовой арены с трибунами на 15000 зрителей

Для геометрических размеров зала коэффициенты облученности:

лед-потолок $\varphi_{n-l} = 0,26$, стены - потолок $\varphi_{cm-n} = 0,74$.

Для этого заларезультаты расчетов:

$t_g, ^\circ\text{C}$	+12	+14	+16	+18	+20	+22	+24
$t_n, ^\circ\text{C}$	9,43	11,17	12,91	14,65	16,40	18,14	19,89
$t_g - t_n, ^\circ\text{C}$	2,57	2,90	3,09	3,35	3,60	3,86	4,11
критическая $\phi_\theta, \%$	84,3	83,1	81,9	80,8	79,8	78,8	77,8

Физическая картина рассматриваемых процессов следующая.

В результате радиационного охлаждения от ледовой площадки, поверхность потолка охлаждается. Благодаря разнице температур возникает радиационный теплоперенос от остальных поверхностей к потолку.

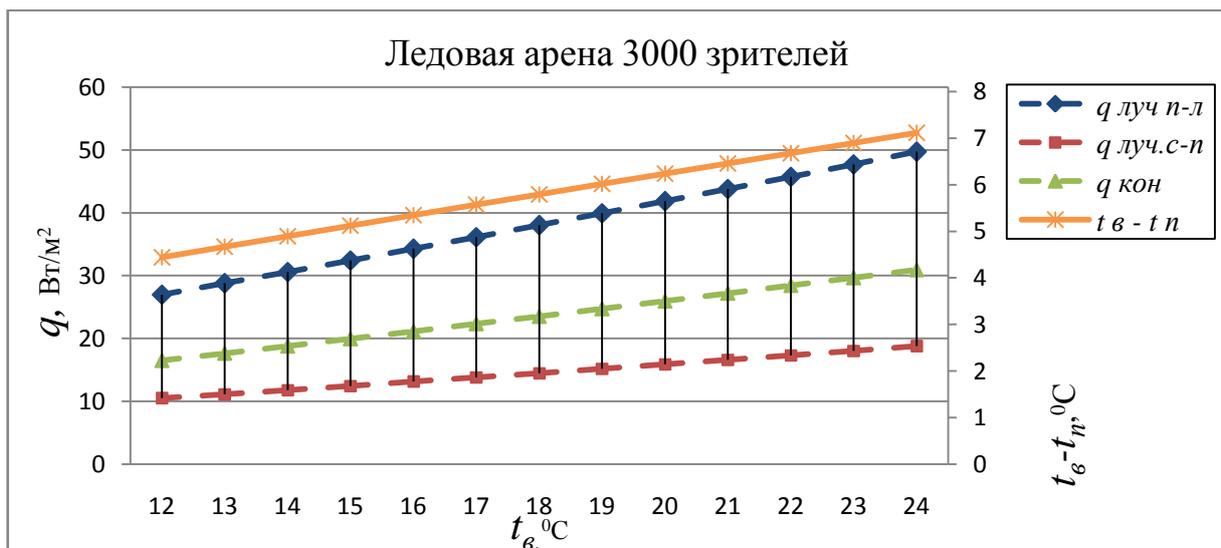
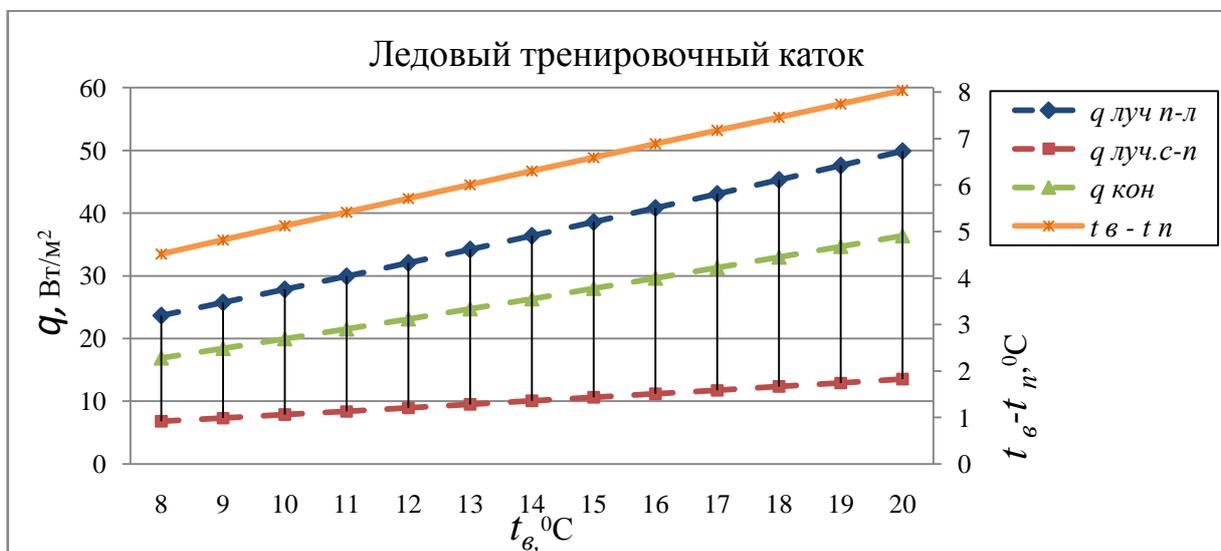
Из-за разницы температур с воздухом возникает свободная конвекция от поверхности потолка. В процессе сложного теплообмена потолок приобретает такую температуру, при которой устанавливается тепловой баланс (14).

По результатам расчетов построены графики (рис.9) изменения расчетных величин плотности теплового потока лучистого теплообмена потолок- лед q_{n-l} , стены- потолок $q_{луч.c-n}$, потока конвективной теплоотдачи от потолка в воздух $q_{конв}$, а также разницы

между температурой воздуха в зале и установившейся в процессе взаимного теплообмена температуры потолка $t_g - t_n$, в зависимости от температуры воздуха соответственно для 3 залов.

Из совместного рассмотрения видно, что с увеличением геометрических размеров зала, за счет уменьшения коэффициента облученности, плотность радиационного теплового потока от потолка к ледовой площадке убывает.

В тепловом балансе потолка увеличивается вклад радиационного нагрева от стен, величина конвективной составляющей наоборот падает по причине уменьшения глубины охлаждения поверхности.



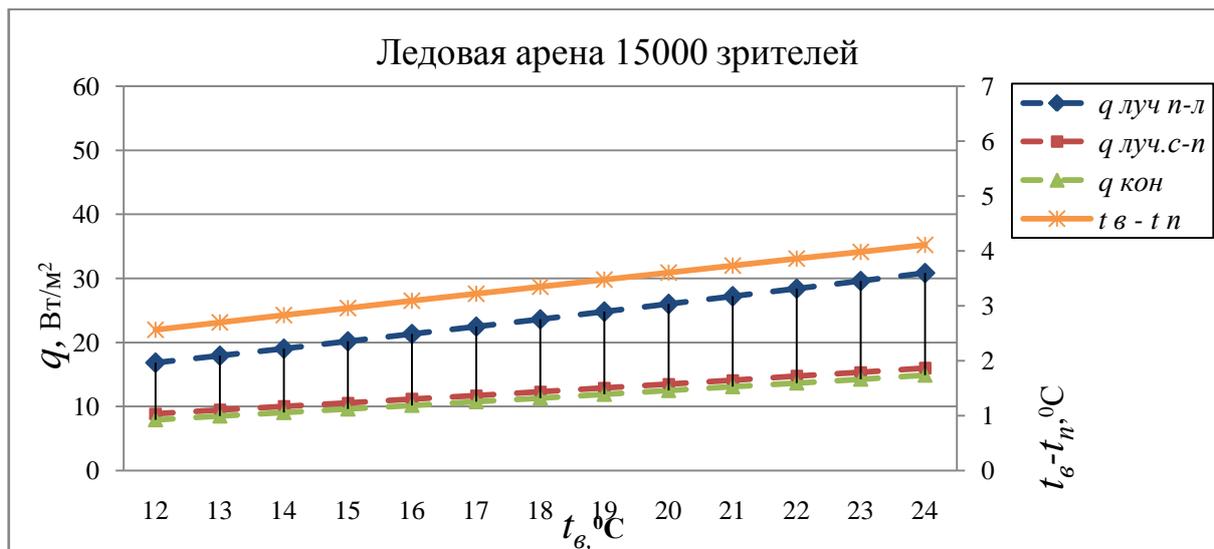


Рис.9 Графики изменения составляющих тепловой баланс потолка величин $q_{н-л}, q_{луч.с-н}, q_{конв},$ разности температур поверхности потолка с воздухом $t_в - t_н,$ в зависимости от температуры воздуха в зале тренировочного катка, ледовой арены с трибунами на 3000 мест и крупной ледовой арены вместимостью 15000 зрителей.

В предыдущих расчетах, целью которых было определить опасные по возможности возникновения конденсата на поверхности температурные режимы, мы не учитывали влияние теплопередачи через конструкцию.

Плотность теплового потока от теплопередачи за счет разогрева поверхности покрытия здания от солнечной радиации можно определить по методике из [1]:

$$q_{mn} = K_{mn} \cdot (t_{н.усл} - t_n) \tag{26}$$

где условная температура наружного воздуха $t_{н.усл} = t_n + \Delta t_p,$

$\Delta t_p = \frac{pq_0}{\alpha_n}$ - температурная добавка, эквивалентная действию солнечной радиации,

α_n - коэффициент теплообмена на наружной поверхности покрытия,

p - коэффициент поглощения поверхностью,

q_0 - интенсивность солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность,

K_{mn} - коэффициент теплопередачи конструкции.

Для баланса поверхности потолка уравнение (14) с учетом теплопередачи:

$$\alpha_{луч.н-л} \cdot (t_n - t_l) = \alpha_{луч.с-н} \cdot (t_в - t_n) + \alpha_{кон} \cdot (t_в - t_n) + K_{mn} \cdot (t_{н.усл} - t_n) \tag{27}$$

Рассчитаем тепловой баланс поверхности потолка крытого тренировочного ледового катка для климатических условий г. Санкт-Петербурга [2]

Упрощенно для процесса теплоусвоения солнечной радиации принимаем $q_0 = 319 \text{ Вт/м}^2$ - среднесуточное поступление солнечной радиации, для защитного слоя рулонной кровли из светлого гравия $p = 0,65$,

В соответствии с [1] $\alpha_n = 8,7 + 2,55v_n = 8,7 + 2,55 \cdot 1 = 11,25 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$,

где v_n - расчетная скорость ветра.

Для коэффициента теплопередачи K_{mn} без учета теплоотдачи от внутренней поверхности

$K_{mn} = \frac{1}{R_k + \frac{1}{\alpha_{нар}}}$ принимаем нормированное в соответствии с [8] значение сопротивления

теплопередаче $R_k = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$, тогда $K_{mn} = 0,304 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$, $\Delta t_p = \frac{0,65 \cdot 319}{11,25} \approx 18,4 \text{ °C}$,

$t_{н.усл} = 24,8 + 18,4 = 43,2 \text{ °C}$.

По формулам (19-24,26) для различных расчетных условий тренировочного катка (рис.1) при температуре льда -5 °C определяем составляющие тепловой баланс (27) величины. Полученные результаты представлены в таблице и на графике рис.11:

$t_в, \text{ °C}$	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
$t'_n, \text{ °C}$	4,76	6,07	7,40	8,74	10,09	11,45	12,82
$t_в - t'_n, \text{ °C}$	3,24	3,93	4,60	5,26	5,91	6,55	7,18
критическая $\phi_в, \%$	80,0	76,6	73,3	70,6	67,9	65,6	63,3

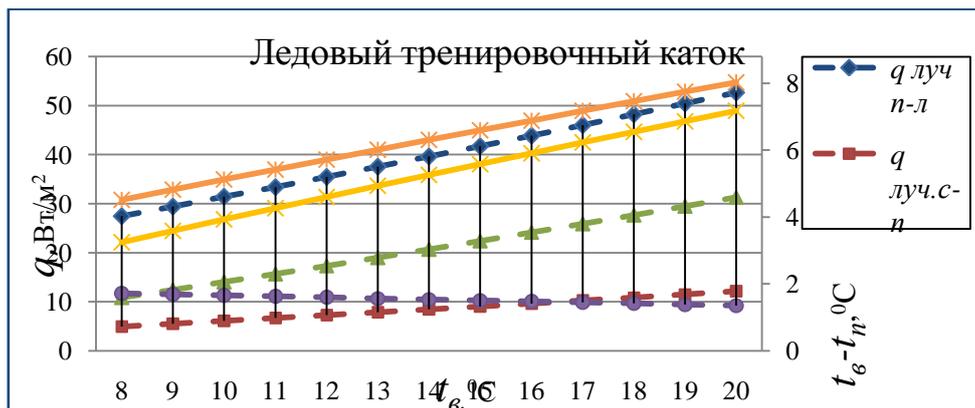


Рис.10 Графики изменения составляющих тепловой баланс потолка величин $Q_{n-л}, Q_{луч.с-п}, Q_{конв}, Q_{mn}$, разности температур воздуха и потолка $t_e - t'_n$ в зависимости от температуры воздуха в зале тренировочного катка. Для сравнения представлена динамика разности температур $t_e - t_n$, рассчитанной без учета теплопередачи через конструкцию Q_{mn} .

Из рассмотрения графиков $t_e - t'_n$ и $t_e - t_n$ видно, что вклад теплопередачи через конструкцию за счет разогрева поверхности покрытия здания от солнечной радиации, уменьшает глубину охлаждения потолка, но при достаточно эффективной теплоизоляции конструкции, влияние этого разогрева не столь значительно.

Иногда на практике происходит **выпадение конденсата из воздуха на поверхностях ограждения хоккейных бортов**, установленных на ледовой площадке. Чаще всего это нежелательное явление наблюдается на защитных стеклах (см. рис.11).



Рис.11 Образование конденсата на защитных стеклах хоккейных бортов

Запишем уравнения теплового баланса для сторон стекла.

Для стороны, обращенной ко льду лучистое охлаждение поверхностью льда, лучистое охлаждение от поверхности потолка, имеющей более низкую температуру, чем поверхность стекла, компенсируются лучистым нагревом от дальней стены, теплопередачей от конвективного потока, образующегося у охлажденной поверхности и теплопередачей от противоположной стороны стекла :

$$q_{\text{луч.ст1-л}} + q_{\text{луч.п-ст1}} = q_{\text{луч.с1-ст1}} + q_{\text{кон.ст1}} + q_{\text{mn.ст2-ст1}} \quad (28)$$

Для другой стороны стекла теплопередача от противоположной охлажденной поверхности в сумме с радиационным охлаждением от потолка компенсируется теплопередачей от конвективного потока воздуха и радиационным нагревом от ближней стены:

$$q_{\text{mn.ст1-ст2}} + q_{\text{луч.п-ст2}} = q_{\text{кон.ст2}} + q_{\text{луч.с2-ст2}} \quad (29)$$

Между сторонами стекла 1 и 2, имеющими температуры $t_{\text{ст1}}$ и $t_{\text{ст2}}$ происходит процесс теплопередачи. Для лучистой теплопередачи в диапазоне длин волн электромагнитного излучения при температурах около $T = 287\text{K}$ стекло является непрозрачным материалом, радиационным теплопереносом в слое можно пренебречь. Плотность теплового потока за счет теплопроводности:

$$q_{\text{mn}} = K_{\text{mn.ст}} \cdot (t_{\text{ст2}} - t_{\text{ст1}}) \quad (30)$$

Коэффициент теплопередачи $K_{\text{mn.ст}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} \quad (31)$

При толщине стекла $\delta_{\text{ст}} = 8\text{мм.}$, величине теплопроводности $\lambda_{\text{ст}} = 0,76\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$,

коэффициент теплопередачи $K_{\text{mn.ст}} = \frac{0,76}{0,008} = 95\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

говорито высокой интенсивности процесса, можно принять $t_{\text{ст2}} \approx t_{\text{ст1}} = t_{\text{ст}}$.

Величины, составляющие тепловой баланс, определяем по [1]:

Плотность потока лучистого теплообмена стекло-лед :

$$q_{\text{луч.ст-л}} = \alpha_{\text{луч.ст-л}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{л}}) \quad (32)$$

где $\alpha_{\text{луч.ст-л}} = c_0 \varepsilon_{\text{ст-л}} \varphi_{\text{ст-л}} b_{\text{ст-л}} \quad (33)$

Плотность лучистого теплового потока стекло- потолок (суммарного потока от обеих сторон):

$$q_{\text{луч.ст-н}} = \alpha_{\text{луч.ст-н}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{н}}) \quad (34)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{луч.ст-н}} = c_0 \varepsilon_{\text{ст-н}} (\phi_{\text{н1-ст1}} + \phi_{\text{н2-ст2}}) + b_{\text{ст-н}} \quad (35)$$

Плотность лучистого теплового потока стены-стекло (суммарного потока на обе стороны), температура стен принимается равной температуре воздуха $t_c \approx t_g$:

$$q_{\text{луч.с-ст}} = \alpha_{\text{луч.с-ст}} \cdot (t_g - t_{\text{ст}}) \quad (36)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{луч.с-ст}} = c_0 \varepsilon_{\text{с-ст}} (\phi_{\text{с1-ст1}} + \phi_{\text{с2-ст2}}) + b_{\text{с-ст}} \quad (37)$$

Плотность теплового потока конвективной теплопередачи от воздуха с обеих сторон стекла:

$$q_{\text{кон.ст}} = 2\alpha_{\text{кон}} (t_g - t_{\text{ст}}) \quad (38)$$

Коэффициент конвективного теплообмена определяем в соответствии с [1] для ламинарного режима течения вдоль поверхности стекла, при средней температуре воздуха $t_g = +14^\circ \text{C}$ - характерной температуре воздуха в зале:

$$\alpha_{\text{кон1}} = 1,13 \cdot \sqrt[3]{t_g - t_{\text{ст}}} \quad (39)$$

Уравнение (35) после произведенных упрощений и подстановки составляющих величин:

$$\alpha_{\text{луч.ст-л}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{л}}) + \alpha_{\text{луч.ст-н}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{н}}) = \alpha_{\text{луч.с-ст}} \cdot (t_g - t_{\text{ст}}) + 2 \alpha_{\text{кон}} (t_g - t_{\text{ст}}) \quad (40)$$

В формулах (33,35,37) приведенные коэффициенты степени черноты:

стекло-лед $\varepsilon_{\text{ст-л}} = 0,95$, стекло-потолок $\varepsilon_{\text{ст-н}} = 0,92$, стены-стекло $\varepsilon_{\text{с-ст}} = 0,93$.

Коэффициенты облученности стекла различными поверхностями, определенные по номограммам из [1]:

лед-стекло $\varphi_{\text{ст-л}} = 0,46$, потолок-стекло, определенный по двум сторонам

$$\varphi_{\text{н-ст}} = \varphi_{\text{н1-ст1}} + \varphi_{\text{н2-ст2}} = 0,34 + 0,14 = 0,48,$$

$$\text{стены-стекло } \varphi_{\text{с-ст}} = \varphi_{\text{с1-ст1}} + \varphi_{\text{с2-ст2}} = 0,10 + 0,86 = 0,96.$$

Условие замкнутости радиационных потоков (10)будет соблюдено для 2 сторон в сумме: $\Sigma \varphi = 2$, после добавления коэффициента облученности стекла от других сторон бортов $\varphi_{\text{ст-ст2-4}} = 0,10$, между которыми теплообмен отсутствует по причине равенства температур.

Значения температуры потолка при различных температурах внутреннего воздуха принимаем по результатам проведенных расчетов из таблицы и графика (рис.9).

По формулам (32-40) для различных расчетных условий тренировочного катка (рис.1) при температуре льда -5°C определяем величины, составляющие тепловой баланс, значения температуры поверхности стекла, определяем критические значения относительной влажности воздуха катка, при которых возможно образование конденсата на охлажденных поверхностях .

Полученные результаты представлены в таблице и на графике рис.13:

$t_g, ^{\circ}\text{C}$	+8	+10	+12	+14	+16	+18	+20
$t_n, ^{\circ}\text{C}$	3,48	4,88	6,28	7,69	9,13	10,54	11,97
$t_{cm}, ^{\circ}\text{C}$	4,98	6,57	8,18	9,78	11,39	13,01	14,63
$t_g - t_{cm}, ^{\circ}\text{C}$	3,02	3,43	3,82	4,22	4,61	4,99	5,37
критическая $\phi_{\phi}, \%$	81,2	79,2	77,4	75,8	74,2	72,6	71,2

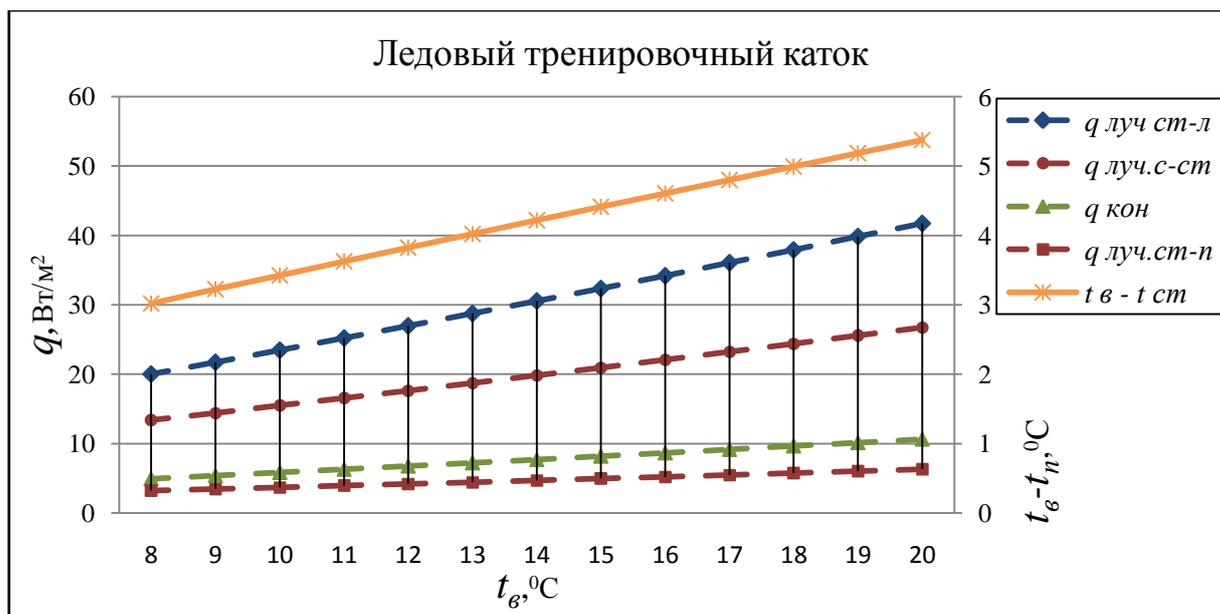


Рис.12 Графики изменения разности температур воздуха и поверхностей защитных стекол хоккейных бортов $t_g - t_{cm}$, в зависимости от температуры воздуха t_g в зале тренировочного катка в процессе лучистого теплообмена со льдом и другими окружающими поверхностями при составляющих тепловой баланс величинах $q_{\text{луч.ст-л}}, q_{\text{луч.с-ст}}, q_{\text{кон}}, q_{\text{луч.ст-п}}$.

Часть 3

В условиях ледового катка под открытым небом наблюдаются несколько другие закономерности радиационного теплопереноса.

Ледовая поверхность при этом подвергается мощному воздействию радиационного излучения от Солнца. Расчетная средняя температура излучения солнечного диска составляет около 6000К [3].

Диапазон солнечного излучения в космосе простирается от $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-8}$ м. в рентгеновской, до $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м. в инфракрасной области спектра.

До земной поверхности благодаря поглощению атмосферы солнечное излучение доходит в диапазоне $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7} \div 3,0 \cdot 10^{-6}$, то есть обрезанным по краям диапазона и ослабленным по мощности. Максимум плотности потока смещается в инфракрасную область и с Земли излучение Солнца приблизительно соответствует таковому от абсолютно черного тела с температурой 5600К, с максимумом плотности теплового потока при длине волны $\lambda_{\text{макс}} \approx 5,2 \cdot 10^{-7}$ м., что в пределах видимого диапазона, который, как известно, составляет: $\lambda \approx 3,8 \cdot 10^{-7} \div 7,8 \cdot 10^{-7}$ м.

Интегральная интенсивность солнечной радиации, прошедшей через земную атмосферу для средних широт распределяется по длинам волн следующим образом [3]:

- в ультрафиолетовом диапазоне – 3%
- в видимом диапазоне – 44%
- в ближнем инфракрасном диапазоне – 53%

Взаимодействие солнечного излучения со слоем льда происходит по иным законам и характеризуется другими характеристиками поглощения- отражения нежели в случае закрытых помещений.

В справочнике [7] для открытых катков также предлагают применить коэффициент $A = 0,5$ - коэффициент поглощения слоя льда на охлаждающей плите, соответствует светлой поверхности бетонной плиты и достаточной чистоте воды, из которой готовят ледяной покров катка.

К сожалению документально точно определить происхождение этого коэффициента не представляется возможным.

Данные, приведенные в статье [5] свидетельствуют об использовании в расчетах показателя «Альбедо» из геофизики и гляциологии.

Там же [5] отмечается существенное расхождение фактически измеренных данных теплопритоков на лед высокогорного спортивного комплекса «Медео» в течение периода эксплуатации с сентября по апрель 1975 г.

с расчетными по общепринятой методике.

Применение публикуемых в литературе по геофизике измеренных значений Альбедо не является корректным по нескольким причинам.

Во-первых, данные по Альбедо разновидностей льда, приводимые в литературе ($A_l = 20-60\%$)[3], относятся к видимой части спектра солнечной радиации.

Во-вторых, физические измерения Альбедо проводятся в основном для сред, имеющих достаточную толщину, для льда – это ледяной покров на водоемах, ледники в горах и др. В соответствии с [3] Альбедо характеризует отражательные свойства «полубесконечного» слоя среды. В нашем случае оптимальная толщина ледового слоя на катке составляет всего 4-5 см.

Оптически лед является полупрозрачной средой, для него характерно поглощение-отражение солнечной радиации больше не поверхностью, а объемом. Так по данным [3] почти полное затухание солнечного света в слое чистого прозрачного льда происходит на глубине до 10 м., для льда замутиненного обильными включениями пузырьков воздуха, эта глубина составляет 1-2 м. При намораживании льда на площадке стремятся получить прозрачную равномерную структуру, однако в процессе изготовления, а затем эксплуатации, неизбежно насыщение массива воздухом и возникновение многочисленных структурных флуктуаций, см. рис.13.

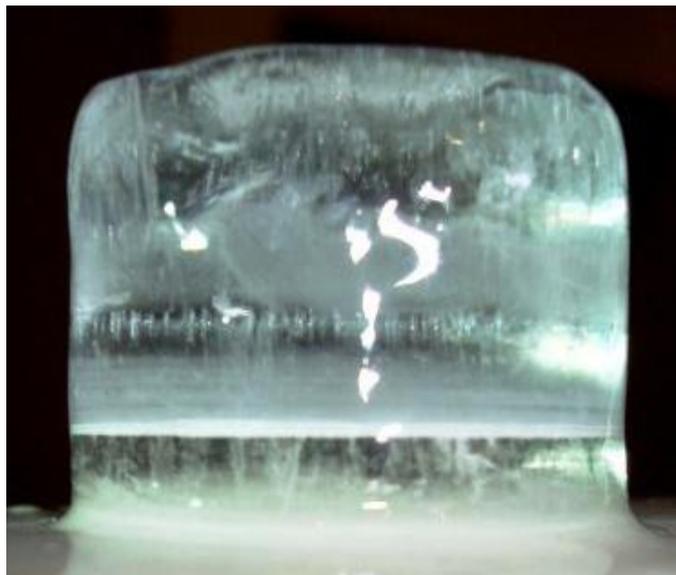


Рис.13 Образец, вырезанный из ледового массива катка.

При определении коэффициента поглощения солнечной радиации льдом на открытом катке необходимо учитывать его свойства в видимом и инфракрасном диапазонах спектра солнечной радиации, свойства отражения – поглощения в объеме при действительной толщине, характеристики отражения подложки – бетона, на котором наморожен лед, также в видимой и инфракрасной областях.

Расчетная схема, иллюстрирующая взаимодействие солнечной радиации со льдом представлена на рис.14:

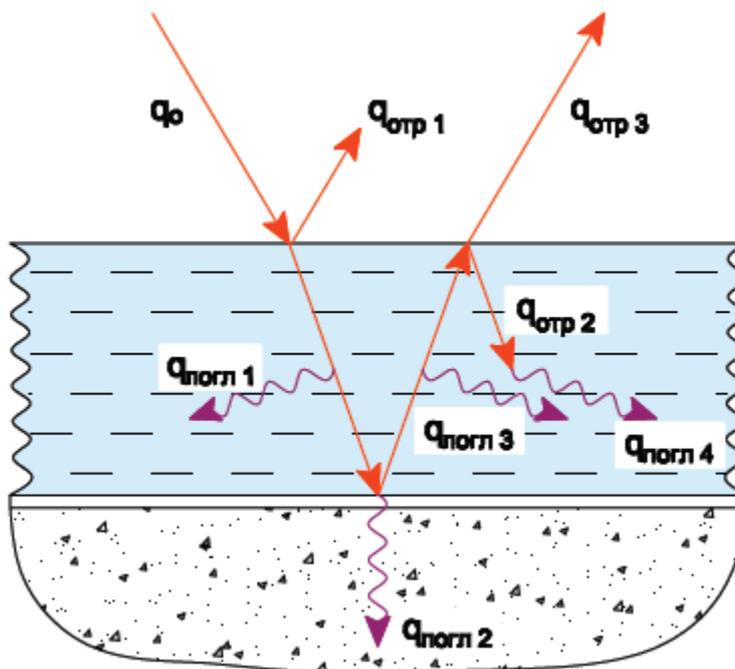


Рис.13 Схема распределения составляющих взаимодействия солнечной радиации с ледовым массивом катка.

Пусть на ледовую площадку поступает поток солнечной радиации плотностью q_0 . Вначале происходит частичное отражение от гладкой поверхности льда. Коэффициент поверхностного отражения для гладкого льда [3] $r \approx 0,05$. Коэффициент поглощения потока солнечной радиации с учетом объемного отражения и поглощения, при прохождении плоского слоя толщиной z [3]:

$$a_z = (1 - Al_\lambda) \frac{1 - \exp(-bz)}{1 + Al_\lambda \cdot \exp(-bz)} \quad (41)$$

Где Al_λ - расчетный спектральный показатель «Альбедо» $Al_\lambda = \frac{b - n}{b + n}$

Дробь в правой части формулы (41) отражает степень проявления Альбеда в зависимости от z , и при достаточной толщине $a_z = (1 - Al_\lambda)$

b - показатель ослабления солнечной радиации льдом за счет объемного поглощения и рассеяния,

n - показатель поглощения.

Рассчитаем поглощение потока солнечной радиации при прохождении слоя льда, толщиной 4 см для **видимой части спектра** ($\lambda_g \approx 4,0 \cdot 10^{-7} \div 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$)

Для прозрачного льда $n \approx 1,0 \text{ м}^{-1}$, средний для видимого диапазона показатель $b = 1,73 \text{ м}^{-1}$, показатель «Альбеда» $Al_{\lambda_g} = 0,27$, для $z = 0,04 \text{ м}$:

$$a_{л.z=0,04}^{солн.г} = (1 - 0,27) \frac{1 - \exp(-1,73 \cdot 0,04)}{1 + 0,27 \exp(-1,73 \cdot 0,04)} \approx 0,039$$

Как видим, объемное поглощение слоя льда 4 см. незначительно и составляет около 4 %.

Далее лучистый поток отражается от подложки – слоя краски на поверхности бетона основания, для белой краски коэффициент поглощения $a_{осн.} \approx 0,2$ (отражение – 80%), затем аналогичным образом поглощается в объеме, и, частично отражаясь внутрь от поверхности, граничащей с воздухом, выходит наружу.

Для всего процесса величина плотности потока солнечной радиации **видимой части спектра** после полного взаимодействия со льдом на окрашенном в белый цвет бетоне (плотность отраженного потока):

$$q^{солн.г} = q_0^{солн.г} (1 - r) \cdot (1 - a_{л.z=0,04}) \cdot (1 - a_{осн.}) \cdot (1 - a_{л.z=0,04}) \cdot (1 - r) = \\ = q_0^{солн.г} (1 - 0,05) \cdot (1 - 0,04) \cdot (1 - 0,2) \cdot (1 - 0,04) \cdot (1 - 0,05) \approx 0,665 \cdot q_0^{солн.г}$$

Где $q_0^{солн.г}$ - плотность видимого потока солнечной радиации, поступающего на лед.

Расчетный суммарный коэффициент поглощения солнечной радиации в видимом диапазоне для рассматриваемой конструкции $A_{л.}^{солн.г} = 1 - 0,665 \approx 0,33$ определяется в основном поверхностью, на которой заморожен лед. Так для льда на неокрашенной бетонной плите (коэффициент поглощения поверхностью бетона $a_{осн.} \approx 0,6$), величина поглощения слоя льда на этой плите: $A_{л.б.}^{солн.г} \approx 0,67$.

Для **ближней инфракрасной области** ($\lambda_{бик} = 8,0 \cdot 10^{-7} \div 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) показатели объемного поглощения – ослабления увеличиваются по сравнению с видимым диапазоном более чем на порядок [3].

Так при $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-6}$ для прозрачного льда $n \approx 30m^{-1}$, $b \approx 50m^{-1}$, соответственно $Al_{бик} \approx 0,25$

$$a_{л.z=0,04}^{солн.бик} = (1 - 0,25) \frac{1 - \exp(-30 \cdot 0,04)}{1 + 0,25 \exp(-30 \cdot 0,04)} \approx 0,487$$

Коэффициент отражения - поглощения белой краски также меняется примерно до 0,7/0,3.

Для поверхностного отражения льда такие данные в литературе отсутствуют, принимаем как для видимого диапазона $r \approx 0,05$.

Величина плотности потока солнечной радиации **ближней инфракрасной области спектра** после полного взаимодействия со льдом на окрашенном в белый цвет бетоне:

$$q_{солн.бик} = q_0^{солн.бик} (1 - r) \cdot (1 - a_{z,\delta=0,04}^{солн.бик}) \cdot (1 - a_{осн}^{солн.бик}) \cdot (1 - a_{л.z=0,04}^{солн.бик}) \cdot (1 - r) =$$

$$= q_0^{солн.бик} (1 - 0,05) \cdot (1 - 0,49) \cdot (1 - 0,3) \cdot (1 - 0,49) \cdot (1 - 0,05) \approx 0,164 \cdot q_0^{солн.бик}$$

Расчетный суммарный коэффициент поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне солнечного излучения прозрачного льда $A_{л}^{солн.бик} \approx 0,84$, мы имеем гораздо более существенное объемное поглощение льдом при толщине 4 см.

С учетом распределения интегральной мощности солнечного излучения по диапазонам, приведенным ранее, осредненная суммарная плотность теплового потока, поглощенного прозрачным льдом толщиной 4 см., замороженном на бетонной плите, выкрашенной белой краской, для всего диапазона:

$$q_{погл.л}^{\Sigma солн.} = (0,47 \cdot 0,33 + 0,53 \cdot 0,84) \cdot q_0^{\Sigma солн.} \approx 0,60 \cdot q_0^{\Sigma солн.}, A_{л1}^{\Sigma солн.} \approx 0,60$$

Для льда на неокрашенной бетонной плите:

$$q_{погл.л}^{\Sigma солн.} = (0,47 \cdot 0,67 + 0,53 \cdot 0,90) \cdot q_0^{\Sigma солн.} \approx 0,79 \cdot q_0^{\Sigma солн.}, A_{л2}^{\Sigma солн.} \approx 0,79$$

Часто для катка устраивают основание с песчаной засыпкой системы охлаждающих трубопроводов, для светлого песка ($a_{осн.} \approx 0,5$):

$$q_{погл.л}^{\Sigma солн.} = (0,47 \cdot 0,58 + 0,53 \cdot 0,88) \cdot q_0^{\Sigma солн.} \approx 0,74 \cdot q_0^{\Sigma солн.}, A_{л3}^{\Sigma солн.} \approx 0,74$$

Полученные расчетные данные для солнечной радиации также заметно отличаются от таковых по методике [7]

Таким образом, величину тепловой нагрузки от солнечной радиации на ледовую площадку катка на открытом воздухе можно определить по формуле:

$$q_{луч}^{солн.} = A_{л}^{солн.} \cdot q_0^{солн.} \tag{42}$$

Где $A_{л}^{солн.} = 0,60 \div 0,80$, в зависимости от поверхности, на которой намораживается лед.

$q_0^{солн.}$ - количество теплоты солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность [2].

На высокогорном спортивном комплексе «Медео» в 1975 г. [5] максимальная величина радиационной нагрузки на лед за сезон была зарегистрирована 28 марта - 530 Вт/м².

Для 44°с.ш., на которой расположен комплекс, максимум солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность [2] составляет 761 Вт/м².

Коэффициент поглощения по данным наблюдения составил $A_l^{солн} = \frac{530}{761} \approx 0,70$, с чем хорошо согласуются расчетные данные.

Нагрузка от солнечной радиации на ледовую поверхность может составлять весьма значительную величину.

Для уменьшения ее влияния можно рекомендовать навесы различных конструкций, защищающие от прямых солнечных лучей.

При этом расчет радиационной нагрузки следует вести уже по методикам для крытых катков, с учетом прогрева конструкции навеса солнцем.

Часть 4

Еще одним видом тепловой нагрузки, происхождение которой подчиняется законам лучистой теплопередачи, является нагрузка от систем искусственного освещения.

В соответствии с современными требованиями для возможности трансляции телевидения высокой четкости (HDTV) [15] требуется обеспечить уровень вертикальной освещенности не менее 2000 люкс на высоте 1м над уровнем ледовой площадки. Суммарная мощность систем освещения для достижения этой величины на хоккейной площадке большой ледовой арены достигает 300 -350 кВт.

В качестве приборов освещения применяют современные прожекторы, по типу изображенных на рисунке 14.



Рис.14 Прожекторы R3 Maxi производства «Siteco» Германия (слева) и ForumFL производства «Disano» Италия (справа), применяющиеся для освещения спортивных объектов.

Источниками света в таких прожекторах служат современные металлогалогенные лампы, имеющие высокую световую отдачу.

Так лампа OsramHQITS 1000W/D/S при мощности 1000 Вт. создает световой поток до 90000 люмен, отдача достигает 90 лм/Вт.

Спектральные характеристики источников света в оптике приблизительно сравниваются с характеристиками излучения абсолютно черного тела соответствующей температуры [14]. Такая эквивалентная температура называется «цветовой температурой источника».

Свет лампы OsramHQITS 1000W/D/S имеет цветовую температуру 5900 К, ее аналог от PhilipsMHN-LA 1000W/956 -5600К, что достаточно близко к температуре солнечного излучения.

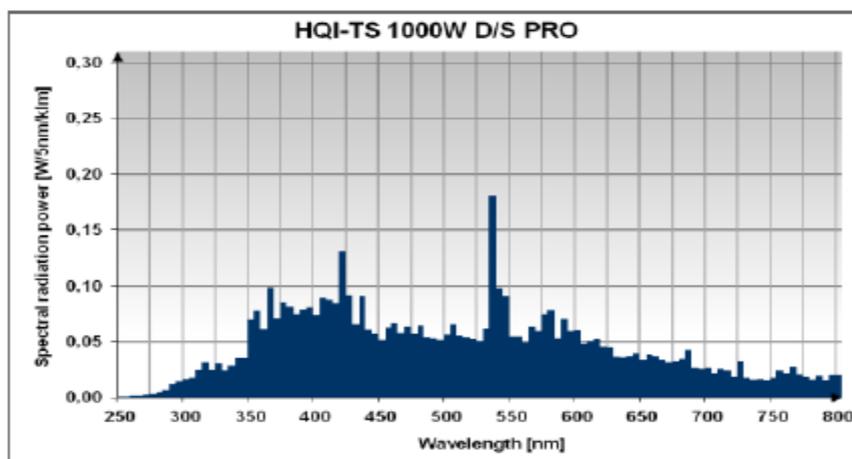


Рис.15 Спектр излучения металлогалогенной лампы OsramHQITS 1000W/D/S

Соответственно для излучения лампы приближенно можно принять распределение светового потока по аналогии с солнечным спектром:

- в видимом и ультрафиолетовом диапазоне – 47%
- в ближнем инфракрасном диапазоне – 53%.

Считается, что вся подведенная к лампе мощность затрачивается на излучение в ее диапазоне.

Светильник имеет свои характеристики эффективности.

Коэффициент полезного действия прожектора может быть вычислен по формуле [14]:

$$\eta_n = \frac{\Phi_n}{\Phi_l} \quad (43)$$

Где Φ_n - световой поток прожектора, лм, Φ_l - световой поток лампы, лм.

У вышеописанных прожекторов по данным изготовителей $\eta_n = 84 - 87\%$ в видимом диапазоне.

В качестве материала отражателя используется полированный алюминий, имеющий примерно постоянные коэффициенты излучения- поглощения- отражения как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах[13]. Значения $\eta_n = 84 - 87\%$ можно принять действительными для всего диапазона излучения лампы, установленной в светильнике без защитного стекла, для конструкции с защитным стеклом, необходимо учитывать пропускание в инфракрасном диапазоне.

Для расчета плотности теплового потока от системы спортивного освещения, поглощенного льдом на искусственном катке, примем рассчитанные ранее для солнечного излучения значения коэффициентов поглощения.

Для льда на бетонной плите, выкрашенной белой краской, в диапазоне излучения искусственного освещения $A_l^{осв} \approx 0,60$.

Величину тепловой нагрузки от спортивного освещения на ледовую площадку катка в закрытом помещении определяем по формуле:

$$q_l^{осв.} = A_l^{осв} \cdot K \cdot \eta_n \cdot N^{осв} \quad (44)$$

Где $A_l^{осв} = 0,60 \div 0,80$ коэффициент поглощения, принимаемый в зависимости от поверхности, на которой намораживается лед, аналогично коэффициентам для солнечного излучения.

$K = 0,8 - 0,9$ - коэффициент, учитывающий долю лучистой энергии, поступающей непосредственно на лед, которая определяется настройкой системы освещения.

$N^{ocв}$ - электрическая мощность системы освещения.

Так как вся мощность светильников переходит в тепловую энергию, то оставшаяся часть, вычисленная по формуле:

$$q_{СКВ}^{ocв.} = (1 - A_l^{ocв.}) \cdot (1 - K) \cdot (1 - \eta_n) \cdot N^{ocв} \quad (45)$$

должна быть компенсирована системами кондиционирования воздуха.

В формуле (37) коэффициент $(1 - \eta_n)$ показывает долю мощности системы освещения, перешедшей в конвективное тепло от светильников в верхней зоне зала, $(1 - K)$ - нагретых поверхностей за пределами ледовой поверхности,

$(1 - A_l^{ocв.})$ - отраженная в зал энергия, переходящая в тепло.

Таким образом, материалы, представленные в работе, могут быть использованы для инженерных расчетов при проектировании, строительстве и обслуживании искусственных ледовых катков.

Список литературы:

1. Богословский В.Н. «Строительная теплофизика» // М.: Высшая школа.-1982.-415с.
2. Внутренние санитарно-технические устройства / Справочник проектировщика // Часть 3 Вентиляция и кондиционирование воздуха // Книга1// под ред. Павлова Н.Н.,Шиллера Ю.И. //М.: Стройиздат. 1992.-319с.
3. Красс М.С., Мерзликин В.Г. «Радиационная теплофизика снега и льда» // Л.: Гидрометеиздат. 1990.-260с.
4. Лихтенштейн Э.Л., Астапов Э.А., Беккергун А.Л., и др. «Рекомендации по проектированию инженерного оборудования искусственных катков»// Л. 1972.
5. Лихтенштейн Э.Л., Вдовиченко В.В. «Высокогорный спортивный комплекс Медео» // Холодильная техника № 6 , 1972. с.6-10.
6. Михеев М.А., Михеева И.М. «Основы теплопередачи»// М.: Энергия. 1977.-344с.
7. Различные области применения холода // под ред. А.В. Быкова - М.: Агропромиздат. 1985.-272с.
8. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий //М. ГОССТРОЙ России.
9. ASHRAE 2005 / Fundamentals Handbook, ch.3. Heat Transfer.
10. ASHRAE 2006 / Refrigeration Handbook, ch.35. Ice Rinks.
11. YORK Refrigeration / Artificial Ice Rinks / 1999.

- 12.ГОСТ 6047-90 (СТ СЭВ 1123-78) Прожекторы общего назначения. Общие технические условия.
 - 13.Ахманов С.А., Никитин С.Ю. “Физическая оптика” // М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004.-656с.
 - 14.Шредер Г., Трайбер Х. “Техническая оптика” //М.: Техносфера. -2006.-424с.
 - 15.Свод правил по проектированию и строительству. Физкультурно-спортивные залы. СП 31-112-2007. Часть 3. Крытые ледовые арены.
1. Bogoslovskij V.N. “Stroitel'najateplofizika” // М.: Vysshajashkola. -1982.-415s.
 2. Vnutrenniesanitarno-tehnicheskieu strojstva / Spravochnikproektirovshhika // Chast' 3 Ventiljacija i kondicionirovanievozduha // Kniga1 // pod red. Pavlova N.N.,ShilleraJu.I. // М.: Strojizdat. 1992.-319s.
 3. Krass M.S., Merzlikin V.G. “Radiacionnajateplofizikasnaga i l'da” // L.: Gidrometeoizdat. 1990.-260s.
 4. LihtenshtejnJe.L., AstepovJe.A., Bekkergun A.L., i dr. “Rekomendaciipoproektirovanijuinzhenernogooborudovanijaiskusstvennyhkatkov” // L. 1972.
 5. LihtenshtejnJe.L., Vdovichenko V.V. “VysokogomyjsportivnyjkompleksMedeo” // Holodil'najatehnika № 6 , 1972. s.6-10.
 6. Miheev M.A., Miheeva I.M. “Osnovyteploperedachi” // М.: Jenergija. 1977.-344s.
 7. Razlichnyeoblastiprimenenijaholoda // pod red. A.V. Bykova - М.: Agropromizdat. 1985.-272s.
 8. SNiP 23-02-2003 Teplovajazashhitazdanij //М. GOSSTROJ Rossii.
 9. ASHRAE 2005 / Fundamentals Handbook, ch.3. Heat Transfer.
 10. ASHRAE 2006 / Refrigeration Handbook, ch.35. Ice Rinks.
 - 11.YORK Refrigeration / Artificial Ice Rinks / 1999.
 12. GOST 6047-90 (ST SJeV 1123-78) Prozhektoryobshhegonaznachenija. Obshhietehnicheskieu slovija.
 - 13.Ahmanov S.A., NikitinS.Ju. “Fizicheskajaoptika” // М.: Izd-vo MGU; Nauka, 2004.-656s.
 - 14.Shreder G., Trajber H. “Tehnicheskajaoptika” //М.: Tehnosfera. -2006.-424s.
 - 15.Svodpravilpoproektirovaniju i stroitel'stvu. Fizkul'turno-sportivnye zaly. SP 31-112-2007. Chast' 3. Krytyeledovyeareny.