

УДК 685.659.1+536.48

ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕДОВОГО ПОЛЯ КРЫТЫХ ИСКУССТВЕННЫХ КАТКОВ

Докт. техн. наук, проф. ДЯЧЕК П. И., асп. ЛИВАНСКИЙ Д. Г.

Белорусский национальный технический университет

Основание ледового поля представляет собой многослойную конструкцию, включающую в себя ледовое поле, бетонную плиту с замоноличенными трубопроводами системы охлаждения, слой теплоизоляции и грунтовый массив с трубопроводами системы защиты нижележащих слоев от промерзания. Глубина заложения труб системы холодоснабжения h_6 составляет 20–30 мм, а шаг укладки труб $a = 75–125$ мм. Трубопроводы системы охлаждения присоединяются к подающей и обратной магистралям вдоль длинной или короткой стороны катка [1–3]. Применяются различные схемы укладки труб системы охлаждения: змеевиковая, с промежуточным коллектором, удвоенным числом коллекторов, а также с наклонным расположением охлаждающих труб.

Согласно международным стандартам разность температур между двумя любыми точками на ледовом поле должна быть не более $0,5$ °С [4, 5]. Так, наличие локальных температурных неоднородностей ледового поля в $2–3$ °С на вираже может привести к падению спортсмена вследствие заметного изменения условий скольжения на данном «температурном пятне». Как правило, минимальный характерный размер возможного «температурного пятна» определяется шагом раскладки в бетонной плите труб системы охлаждения и составляет ≈ 10 см. Тем не менее, даже такая незначительная по размеру локальная неоднородность реально может спровоцировать сбой при прохождении дистанции спортсменом.

Температурный режим ледового поля должен соответствовать требованиям, предъявляемым условиями конкретного вида спортивных соревнований. Для конькобежцев – это жесткий лед; для фигуристов – более упругий и мягкий; для хоккеистов – прочный, устойчивый к трещинам. Требуемые свойства льда достигаются за счет поддержания установленной для каждого вида соревнований температуры: так, для скоростного бега на коньках – (-7) °С, для хоккея – (-5) °С, для фигурного катания – (-4) °С [1–5].

В разных литературных источниках рекомендуются различные конструкции ледовых полей (рис. 1). Технологическую основу ледовых полей (арен, площадок) составляют преимущественно трубные системы охлаждения.

Различные конструкции оснований ледовых полей свидетельствуют о разных подходах к проектированию и методам теплотехнического расчета.

При расчете параметров конструкции элементов ледового поля (рис. 2) необходимо установить: расстояние между осями труб системы охлаждения бетонной плиты a , глубину заложения h_6 и диаметр труб d , толщину слоя теплоизоляции, параметры хладоносителя $t_{хп}$, $t_{хо}$ и т. д. Инвестиции в устройство ледового поля и эксплуатационные затраты должны быть минимальными, но качество льда – высоким.



Рис. 1. Варианты конструкции оснований ледовых полей

На основании приведенных выше сведений и данных литературных источников [4, 5] решается задача распространения теплоты в основании ледового поля крытых искусственных катков.

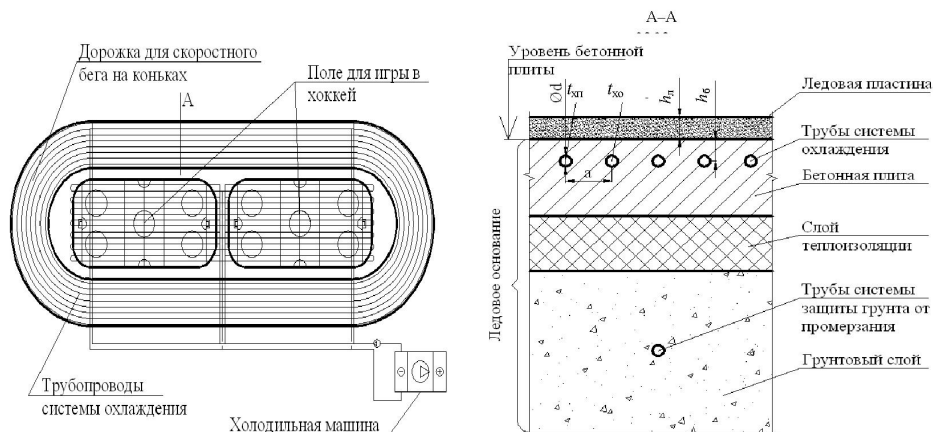


Рис. 2. Система охлаждения ледового поля, разрез А-А основания ледового поля: d – диаметр труб системы охлаждения, мм; a – шаг укладки трубопроводов, мм; h_6 – толщина слоя бетона над трубами системы охлаждения, мм; $h_л$ – то же ледовой пластины, мм; $t_{хп}$ – температура хладоносителя в подающем трубопроводе, °С; $t_{хо}$ – то же в обратном трубопроводе, °С

Если пренебречь эффектами на краях ледового поля (рис. 2), то во всех поперечных сечениях системы по отношению к охлаждающим трубам поле распределения температур с достаточной степенью достоверности может быть принято двумерным. Это утверждение справедливо и ввиду малости линейного изменения температуры хладонносителя. В силу этого при исследовании рассматриваемых процессов решается двумерное дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\rho(x, y, T)c(x, y, T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(x, y, T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(x, y, T)\frac{\partial T}{\partial y}\right], \quad (1)$$

где $\lambda(x, y, T)$, $c(x, y, T)$, $\rho(x, y, T)$ – теплофизические коэффициенты (теплопроводность, теплоемкость, плотность) в рассматриваемой точке расчетной области; τ – время; x, y – координаты; T – температура.

Размеры поля для игры в хоккей – 60×30 м, а длина дорожки для скоростного бега на коньках – 400 м при ширине 16 м (рис. 2). В качестве расчетной области принято поперечное сечение по отношению к охлаждающим трубам шириной в 1 м (определяется шагом раскладки труб системы обогрева грунта, рис. 2, разрез А–А).

Теплофизические характеристики материалов ($\lambda(x, y, T)$, $c(x, y, T)$, $\rho(x, y, T)$) принимаются при следующих допущениях:

- при строительстве крытых катков используются строительные материалы, соответствующие действующим нормативным документам;
- увлажнение материалов извне отсутствует.

Ледовые поля эксплуатируются после достижения требуемого температурного режима, который характеризуется неизменностью во времени температуры ледовой пластины. Таким образом, в рамках данного исследования к изучению приняты параметры стационарных температурных полей. В этой связи упрощается проблема формирования начального распределения температуры: $T_0 = T(x, y, 0)$. Функция $T_0 = T(x, y, 0)$ для расчетной области может задаваться произвольно, а искомое температурное поле найдем путем решения (1) методом установления, т. е. для $\tau \rightarrow \infty$.

При решении дифференциального уравнения теплопроводности граничные условия задаются исходя из конкретных условий переноса теплоты на границах расчетной области.

Граничные условия определяются следующим образом:

$$\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_s = \Sigma q - \text{для границы сопряжения ледового поля с окружающей}$$

средой, где $\Sigma q = q_k + q_\phi + q_p$ [4]; q_k – конвективный тепловой поток, $q_k = \alpha_k(T_b - T_l)$; q_ϕ – тепловой поток за счет скрытой теплоты фазового перехода водяных паров в твердую фазу, $q_\phi = mr = \alpha_D(\rho_{пв} - \rho_{пл})r$ [6]; q_p – то же за счет переноса тепловой энергии излучением; s – граница; α_k – ко-

эффицент теплообмена, $\alpha_k = k \left[\frac{T_b - T_l}{b} \right]^{1/4}$; T_b , T_l – температуры воздуха и поверхности льда; m – удельный поток массы водяных паров к поверхности льда; r – теплота фазового перехода «пар – жидкость – лед»; $\rho_{пв}$ и $\rho_{пл}$ – плотности водяных паров в воздухе и над поверхностью льда; α_D – коэффициент массообмена, $\alpha_D = k_D \left[\frac{T_b - T_l}{b} \right]^{1/4}$; k и k_D – коэффициенты, зависящие от температуры окружающей среды T_b ; b – ширина ледового поля [6];

$$q_p = \varepsilon_{пр} \sigma_0 \frac{\varphi' F_{п}}{F_{л}} (T_{п}^4 - T_{л}^4),$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты, $\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{л}} + \frac{F_{л}}{F_{п}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{п}} - 1 \right)}$; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; $\varphi' F_{п}$ – коэффициент лучистого теплообмена; $F_{л}$ – площадь ледового поля; $T_{п}$ – температура окружающих поверхностей;

$T_{хп} = \text{const}$; $T_{хо} = \text{const}$; $T_{оп} = \text{const}$; $T_{оо} = \text{const}$ – для поверхности труб систем охлаждения и обогрева грунта;

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_s = q_{зем} - \text{для нижней границы ледового основания, где } q_{зем} - \text{геотермальный тепловой поток, для большинства регионов с высокой достоверностью может быть принят равным нулю;}$$

термальный тепловой поток, для большинства регионов с высокой достоверностью может быть принят равным нулю;

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_s = 0 - \text{для боковых границ элемента ледового основания;}$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial n} - \text{для внутренних границ в местах сопряжения различных}$$

материалов основания ледового поля.

Задача решалась с помощью метода конечных элементов. Ниже приведены результаты расчета температурного поля при следующих конструктивных характеристиках расчетной области: $\delta_{л} = 40$ мм – толщина слоя льда; $\delta_{б} = 160$ мм – то же бетонной плиты; $h_{б} = 30$ мм – то же слоя бетона над трубами охлаждения; $\delta_{т} = 200$ мм – то же теплоизоляции; $\delta_{гр} = 500$ мм – то же грунта с системой обогрева; $a_{хп} = 100$ мм – шаг укладки труб охлаждения; $a_{огр} = 1000$ мм – то же обогрева грунта; $d_{хп} = 25$ мм – внутренний диаметр труб охлаждения; $d_{огр} = 25$ мм – то же обогрева грунта; $T_{хп} = -(10-14)$ °С – температура хладоносителя в подающем трубопроводе; $T_{хо} = -9$ °С – то же в обратном трубопроводе; укладка трубопроводов принята U-образно с чередованием подающего и обратного трубопроводов.

Согласно международным стандартам допускается разность температур между любыми точками на ледовом поле не более 0,5 °С. Нами установлено, что величина температурной неоднородности поверхности ледо-

вой пластины не зависит от температуры контактирующего с ней воздуха (рис. 3б). Температура окружающей воздушной среды определяет только численное значение температуры поверхности льда $T_{\text{л}}$, °С (рис. 3а) и величину теплопритоков к ледяной пластине q , Вт (рис. 4).

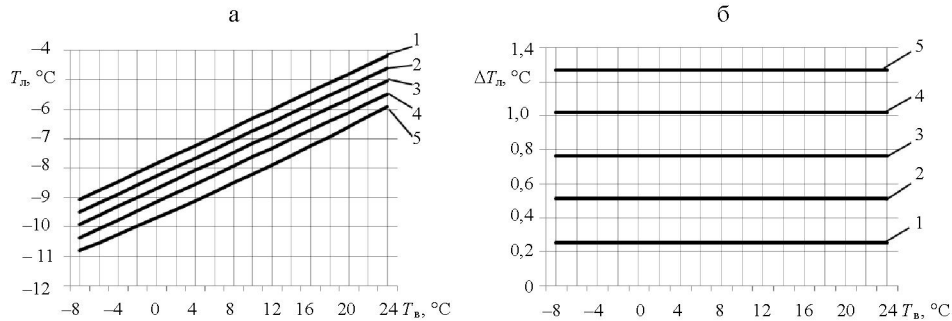


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности льда $T_{\text{л}}$ (а) и температурной неоднородности поверхности льда $\Delta T_{\text{л}}$ (б) от температуры окружающей среды $T_{\text{в}}$ и перепада температур хладоносителя в подающем и обратном трубопроводах $\Delta T_{\text{хн}}$; 1 – $\Delta T_{\text{хн}} = 1$ °С; 2 – 2 °С; 3 – 3 °С; 4 – 4 °С; 5 – $\Delta T_{\text{хн}} = 5$ °С

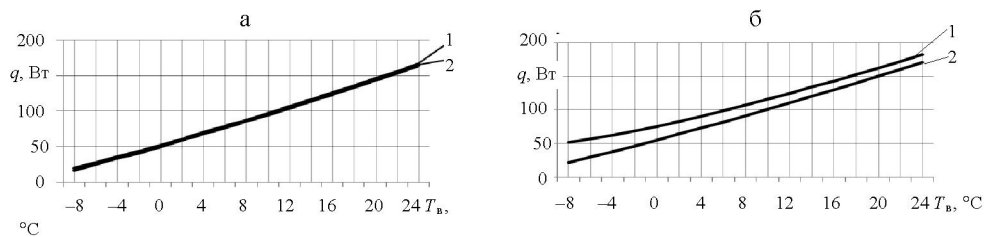


Рис. 4. Зависимость величины теплопритоков q , от температуры окружающей среды $T_{\text{в}}$ и перепада температур хладоносителя: а – $\Delta T_{\text{хн}} = 1$ °С; б – 5 °С; 1 – над подающим трубопроводом; 2 – над обратным трубопроводом

Температуры хладоносителя $T_{\text{хп}}$, $T_{\text{хо}}$, °С, определяют температуру поверхности ледового поля $T_{\text{л}}$ при различных параметрах окружающей среды $T_{\text{в}}$ (рис. 3а), формируя тем самым температурный режим льда.

На рис. 3б представлена температурная неоднородность поверхности ледовой пластины, перпендикулярной по направлению к трубопроводам системы охлаждения для определенных выше параметров расчетной области. По мере удаления подающего и обратного трубопроводов от коллектора системы охлаждения температура хладоносителя будет становиться равной их средней температуре, т. е. $T_{\text{хн}} = \frac{T_{\text{хп}} + T_{\text{хо}}}{2}$.

Поэтому температурная неоднородность поверхности льда параллельно трубопроводам системы охлаждения в два раза меньше температурной неоднородности перпендикулярной трубопроводам системы ния. Согласно данным рис. 3б на величину температурной неравномерности поверхности льда оказывает влияние только перепад температур хладоносителя $\Delta T_{\text{хн}}$.

Расчеты свидетельствуют, что с увеличением диаметра и шага труб повышается и температурная неоднородность поверхности ледовой пластины (рис. 5).

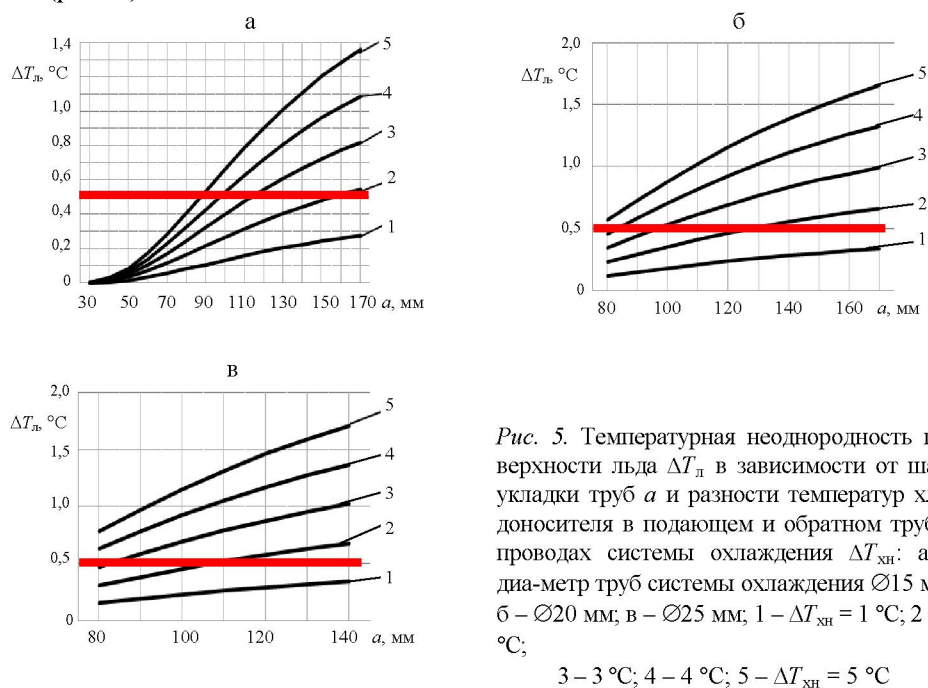


Рис. 5. Температурная неоднородность поверхности льда $\Delta T_{л}$ в зависимости от шага укладки труб a и разности температур хладагента в подающем и обратном трубопроводах системы охлаждения $\Delta T_{хн}$: а – диаметр труб системы охлаждения $\varnothing 15$ мм; б – $\varnothing 20$ мм; в – $\varnothing 25$ мм; 1 – $\Delta T_{хн} = 1$ °C; 2 – 2 °C; 3 – 3 °C; 4 – 4 °C; 5 – $\Delta T_{хн} = 5$ °C

Данные рис. 5 показывают, что для трубопроводов системы охлаждения $\varnothing 15$ мм максимально возможный шаг укладки, обеспечивающий допустимую неравномерность температур на поверхности льда, при разности температур хладагента в подающем и обратном трубопроводах, равной 5 °C, составляет 87 мм. Видно также, что с увеличением диаметра труб для достижения требуемой температурной неоднородности поверхности ледовой пластины следует уменьшать шаг раскладки и перепад температур между подающим и обратным трубопроводами.

Рекомендуемые параметры раскладки трубопроводов системы охлаждения, полученные по результатам данного исследования, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Шаг укладки труб системы охлаждения, обеспечивающий требуемую температурную неоднородность ледового поля

Показатель		Максимально возможный шаг укладки труб системы охлаждения a , мм, при котором $\Delta T_{л} < 0,5$ °C				
Разность температур подающего и обратного трубопроводов системы охлаждения $\Delta T_{хн}$, °C		5	4	3	2	1
Трубопровод системы охлаждения	$\varnothing 15$ мм	87	96	113	154	>170
	$\varnothing 20$ мм	–	83	98	128	>170
	$\varnothing 25$ мм	–	–	82	105	>140

Величина шага укладки труб определяет непосредственно капитальные затраты на устройство трубной системы охлаждения. Величина перепада

температур в подающем и обратном трубопроводах определяет количество хладоносителя и энергетические затраты на его циркуляцию в системе охлаждения. В то же время сочетание шага 70–100 мм и разности температур 3–5 °С позволяет обеспечить температурную неравномерность на поверхности льда менее 0,5 °С (рис. 5а, б, в, табл. 1).

Толщина слоя льда и бетона над трубопроводами системы охлаждения оказывает одинаковое влияние на температурную неоднородность ледового поля. На рис. 6 приведена зависимость $\Delta T_{\text{л}}$ от шага укладки труб a и толщины слоя льда $h_{\text{л}}$ при разности температур хладоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы охлаждения $\Delta T_{\text{хн}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Как видно из рис. 6, увеличение толщины льда позволяет снизить температурную неоднородность ледового поля. Однако дополнительное увеличение толщины льда, естественно, приводит к росту энергозатрат на компенсацию теплопритоков в режиме намораживания и эксплуатации ледового стадиона. Повышается также инерционность системы в процессе управления температурой поверхности при переводе ее с одного температурного режима на другой.

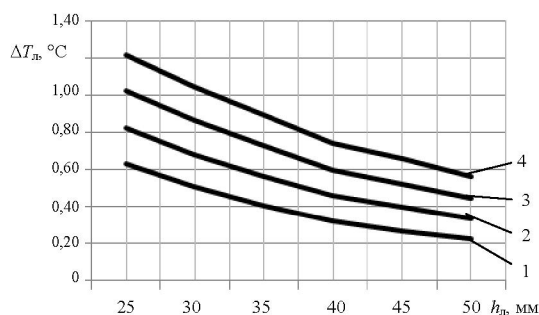


Рис. 6. Зависимость температурной неоднородности ледового поля $\Delta T_{\text{л}}$ от толщины слоя льда $h_{\text{л}}$ и шага укладки труб a : 1 – 70 мм; 2 – 80 мм; 3 – 90 мм; 4 – 100 мм

ВЫВОД

Полученные в результате исследований данные по величине теплового потока и температурной неоднородности поверхности ледовой пластины могут помочь найти технические решения, повышающие качество льда и уровень спортивных достижений. Совокупный анализ различных конструкций оснований ледового поля позволит определить оптимальное сочетание конструктивных параметров, обеспечивающих наилучшие условия для достижения высоких спортивных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р е к о м е н д а ц и и по проектированию инженерного оборудования искусственных катков (хладотехническая часть). – Л.: ЛЕНЗНИИЭП, 1972. – 100 с.
2. П р а в и л а ИИХФ по строительству и эксплуатации катков. Международная федерация хоккея на льду (ИИХФ).
3. I s e r i n k s. ASHRAE Handbook 2002. Refrigeration, 2002. – 11 с.
4. П р о е к т и р о в а н и е спортивных и физкультурно-оздоровительных зданий, сооружений и помещений: П2-2000 к СНиП 2.08.02-89 – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2001. – 94 с.
5. Ф и з к у л ь т у р н о - с п о р т и в н ы е залы. – Ч. 3: Крытые ледовые арены: СП 31-112–2007. – М., 2008. – 139 с.