

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОСНОВАНИЯ ЛЕДОВОГО ПОЛЯ

Асп. ЛИВАНСКИЙ Д. Г.

*Белорусский национальный технический университет*

В литературе [1–4] приводятся несколько вариантов конструкций основания ледового поля, которые можно подразделить по материалу технологической плиты охлаждения: на бетонную плиту и плиту из песчаной засыпки; по виду основания: неизолированный, изолированный и с обогревом грунта. Выбор одной из конструкций обусловлен величиной затрат. Так, при устройстве бетонной плиты капитальные затраты выше, а эксплуатационные расходы ниже, чем у плиты из песчаной засыпки. Любая плита охлаждения должна обеспечивать равномерное распределение температуры на поверхности льда. Различие в температуре для любых двух точек ледового поля должна быть менее  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4].

Конструктивные характеристики плиты охлаждения (рис. 1): наружный диаметр трубопроводов ( $d_n$ , мм), шаг укладки трубопроводов ( $a$ , мм), толщина слоя бетона/песка над трубопроводами ( $h$ , мм), коэффициент теплопроводности бетона/песка ( $\lambda$ , Вт/(м·°К)), тип трубного коллектора ( $U$ -образный, змеевиковый, с промежуточным коллектором, удвоенным числом коллекторов и наклонным расположением охлаждающих труб), а также толщина слоя льда ( $h_{л}$ , мм) и температуры хладагента в подающем и обратном трубопроводах ( $t_{хп}$ ,  $t_{хо}$ , °С) – в комплексе определяют температурный режим ледового поля и соответственно качество льда.

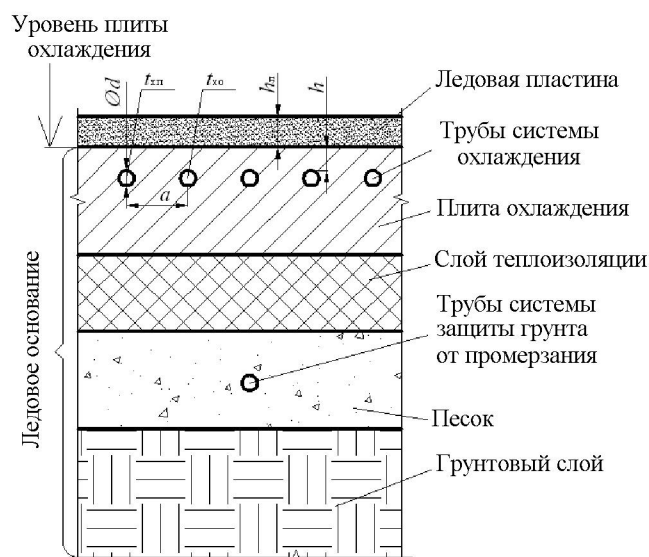


Рис. 1. Конструкция основания ледового поля на грунте:  
 $a = 100$  мм;  $\varnothing 25$  мм;  $d_n = 32$  мм;  $h_{л} = 25$  мм;  $h = 25$  мм

К сожалению, отсутствие графиков или аналитических зависимостей, определяющих характер влияния описанных выше параметров на температурный режим льда, приводит к выбору проектировщиком ошибочных решений при разработке конструкции плиты охлаждения. Дефекты выявляются только во время эксплуатации катка, а исправить их без изменения конструкции плиты охлаждения невозможно. Частично эта задача решается за счет увеличения толщины намораживаемого льда, при этом уменьшается температурная неоднородность на поверхности льда и соответственно увеличиваются энергетические затраты.

На основании численного решения дифференциальных уравнений теплопроводности [5] для конструкции основания ледового поля, приведенного на рис. 1, и аналогичной конструкции в случаях отсутствия обогрева грунта и теплоизоляции были рассчитаны локальные тепловые потоки и температурные поля.

На примере наиболее часто встречающейся конструкции основания ледового поля (рис. 1) рассмотрим параметры теплового режима льда. Трубопроводы системы охлаждения располагаются локально на небольшой глубине от поверхности льда, что формирует неравномерный характер распределения тепловых потоков в теле плиты охлаждения (рис. 2).

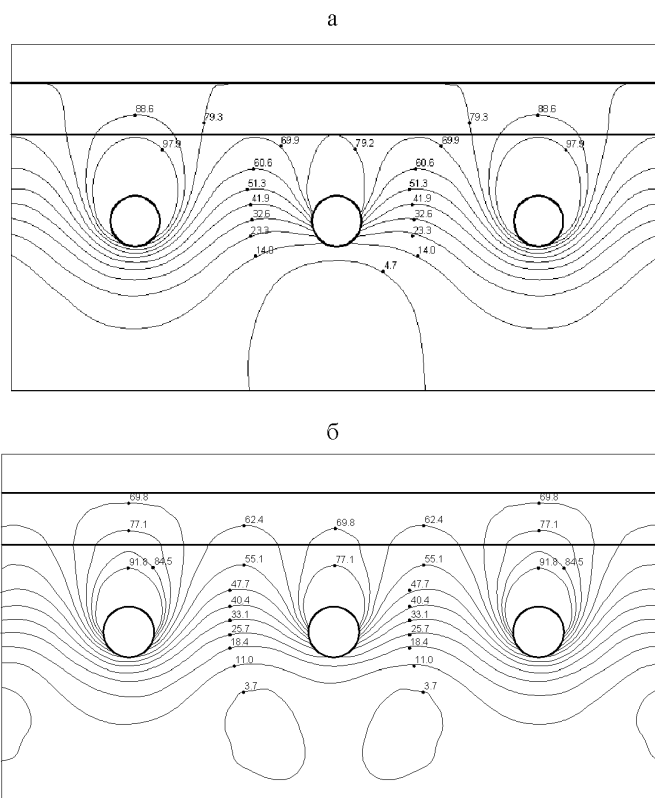


Рис. 2. Распределение теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, внутри: а – ледового поля и бетонной плиты охлаждения; б – ледового поля и плиты охлаждения из песчаной засыпки [5]

На рис. 3 представлены графики распределения температуры для случая чередования подающего и обратного трубопроводов системы охлаждения [5].

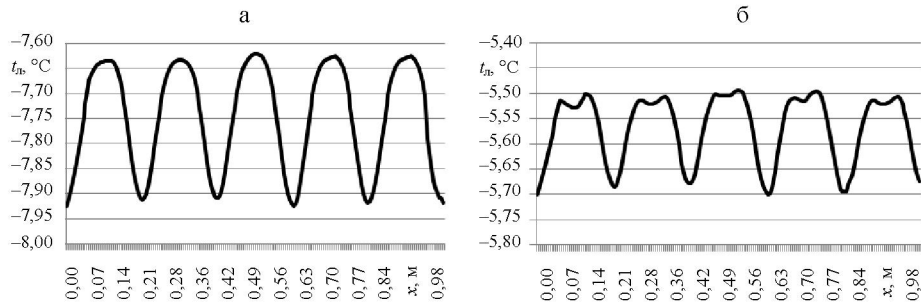


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности льда: а – бетонная плита охлаждения; б – плита охлаждения из песчаной засыпки:  $t_{хп} = -11\text{ °C}$ ;  $t_{хо} = -10\text{ °C}$ ;  $t_{оп} = 10\text{ °C}$ ;  $t_{оо} = 5\text{ °C}$

Видно, что на поверхности льда (рис. 3) формируется неравномерное температурное поле: минимальное значение температуры поверхности льда располагается над подающим трубопроводом, максимальное – над обратным трубопроводом системы охлаждения. Максимальные и минимальные значения температуры на поверхности льда отражают температурную неоднородность ледового поля (рис. 4). Для обеспечения требуемых параметров скольжения температурная неоднородность поверхности ледовой пластины, как уже отмечено выше, должна быть менее  $0,5\text{ °C}$ .

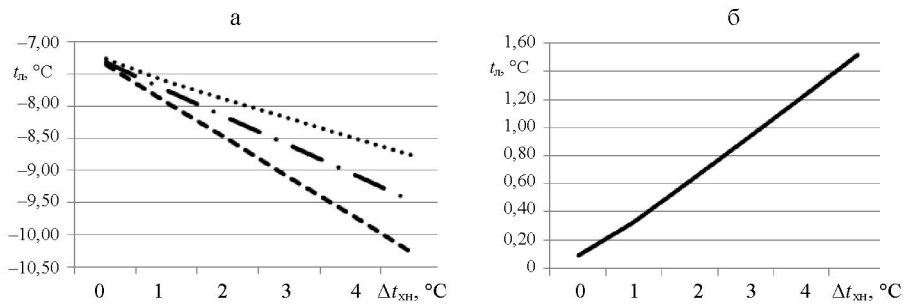


Рис. 4. Зависимости: а – средней, максимальной и минимальной температур поверхности льда; б – температурной неоднородности поверхности ледовой пластины от разности температур хладонносителя ( $t_{хп}$ , °C) в подающем и обратном трубопроводах бетонной плиты охлаждения:  $t_{опр} = 8\text{ °C}$ ;  $t_{хо} = -10\text{ °C}$ ;  $t_{хп} = (-10)\text{--}(-15)\text{ °C}$ ; ..... –  $T_{\max}$ ; - · - · - · –  $T_{\text{средн}}$ ; - - - - -  $T_{\min}$

Различие характера температурной неоднородности (рис. 3) для плит охлаждения из бетона и песчаной засыпки обусловлено различными значениями коэффициента теплопроводности материалов. Как видно из рис. 2а, трубопроводы системы охлаждения, уложенные в бетонной плите, формируют регулярный характер распределения теплового потока, т. е. чередование величины теплового потока относительно подающего и обратного трубопроводов. На рис. 2б представлен иной характер распределения теплового потока в плите охлаждения из песчаной засыпки: чередование величины теплового потока стало не только относительно подающего и обратного трубопроводов, но и относительно зоны между подающим и обратным трубопроводами. Подобное распределение теплового потока формирует два температурных максимума и минимума на поверхности льда, а также увеличивает температурную неравномерность на поверхности льда. Разли-

чие распределения теплового потока внутри ледового поля и плиты охлаждения вызвано более низким коэффициентом теплопроводности у песка в отличие от бетона, что привело к увеличению термического сопротивления слоя над трубопроводами системы охлаждения и снижению влияния температуры хладоносителя в подающем трубопроводе на температуру поверхности льда. Этот факт не отмечается в литературных источниках.

На основании существующих методик теплотехнического расчета [1–3] плиты охлаждения невозможно определить соответствие проектируемой конструкции для обеспечения требуемой температурной неоднородности ледового поля.

Из рис. 3 видно, что в случае применения бетонной плиты охлаждения температурная неоднородность поверхности льда больше ( $\Delta t_{\text{л}} \approx 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), чем при использовании плиты охлаждения из песчаной засыпки ( $\approx 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Однако бетонная плита охлаждения позволяет получить более низкую среднюю температуру поверхности льда при одинаковых параметрах хладоносителя и соответственно мощности холодильной установки, в этой связи следует отметить, что в справочной литературе [1–4] отсутствуют критерии выбора того или иного материала плиты охлаждения. Критерием оценки чаще всего является величина стоимости данной конструкции ледового основания.

В зависимости от продолжительности работы катки можно подразделить на сезонные, эксплуатируемые в течение нескольких месяцев, обычно зимних, и круглогодичные, эксплуатируемые в течение всего года без перерывов. Период эксплуатации катка образует определенные требования к конструкции основания под плитой охлаждения. Это вызвано тем, что температура хладоносителя, циркулирующего в системе охлаждения  $t_{\text{хн}} = (-10)–(-15) \text{ } ^\circ\text{C}$ , что с течением времени может привести к промерзанию грунта под плитой (рис. 5б, в).

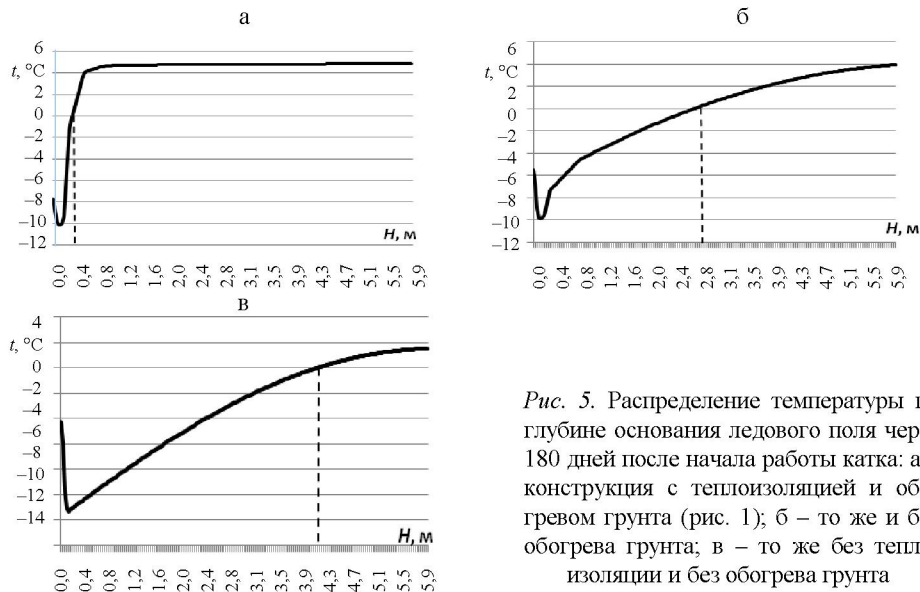


Рис. 5. Распределение температуры по глубине основания ледового поля через 180 дней после начала работы катка: а – конструкция с теплоизоляцией и обогревом грунта (рис. 1); б – то же и без обогрева грунта; в – то же без теплоизоляции и без обогрева грунта

Как видно из рис. 5а, система обогрева исключает вероятность промерзания грунта, т. е. нулевая изотерма остается в слое теплоизоляции и не опускается ниже уровня трубопроводов защиты грунта от промерзания.

Обогрев грунта необходимо устраивать в катках круглогодичного или длительного использования. Иная ситуация с открытыми катками. В настоящее время активно осуществляется строительство временных открытых ледовых катков для массовых катаний на льду. Чаще всего в нашей климатической полосе открытые катки функционируют с ноября по март (или с середины октября по середину апреля) в зависимости от температуры наружного воздуха. Во время эксплуатации открытого катка нулевая изотерма перемещается в глубь грунта (рис. 5б, в), что приводит к изменению его объема вследствие пучинистости и деформации ледовой пластины.

Глубина промерзания (или положение нулевой изотермы) зависит от вида грунта, наличия или отсутствия слоя изоляции и продолжительности работы катка. На рис. 6а, б приведены результаты расчета глубины промерзания грунта в случаях основания ледового поля с и без слоя теплоизоляции путем решения дифференциальных уравнений теплопроводности [5] и по методике, представленной в [1].

Глубина промерзания грунта (рис. 6б) определялась в соответствии с [1] по следующим выражениям:

- в случае неизолированной охлаждающей плиты на влажном грунте (или основание ледового поля без слоя теплоизоляции):

$$h_{\infty} = \sqrt{\frac{0,556\lambda_m(t'_o - t_{\text{п}})}{Q}} \tau (\sqrt{1 - V^2} - V), \text{ м}, \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2\pi} \frac{t_{\text{г}} - t'_o}{\sqrt{t'_o - t_{\text{п}}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{т}} C_{\text{о}}^{\text{т}}}{\lambda_m Q}}, \quad (2)$$

$$Q = 4,187\gamma_{\text{ск}} \frac{W}{100} 80i, \text{ кДж/м}^3, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{т}}$ ,  $\lambda_m$  – коэффициенты теплопроводности соответственно талого и мерзлого грунтов, Вт/(м·К);  $t'_o$  – температура замерзания грунта, °С;  $t_{\text{п}}$  – то же на границе «охлаждающая плита – грунт», °С;  $t_{\text{г}}$  – то же грунта, °С;  $\tau$  – время, прошедшее от начала работы катка, дни;  $V$  – расчетный коэффициент;  $Q$  – теплота замерзания грунта, Вт/м<sup>3</sup>;  $i$  – расчетная льдистость грунта;  $C_{\text{о}}^{\text{т}}$  – объемная теплоемкость талого грунта, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $\gamma_{\text{ск}}$  – объемная масса скелета грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – весовая влажность грунта, %;

- в случае изолированной охлаждающей плиты на влажном грунте (или основание ледового поля со слоем теплоизоляции)

$$h_{\text{из.гр}} = \sqrt{h_{\infty}^2 + S^2} - S, \text{ м}, \quad (4)$$

где  $S = \lambda_m \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}}$ ,  $\delta_{из}$  – толщина теплоизоляционного слоя, м;  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя, Вт/(м·К).

Видно, что полученные зависимости (рис. 6) подобны и отличаются численным значением  $h_{ос}$ . В процессе эксплуатации открытого катка глубина промерзания увеличивается с разной скоростью, что в свою очередь зависит от наличия или отсутствия теплоизолирующего слоя в основании. Различие результатов можно объяснить следующим образом: в рассмотренной методике учитывалось, что начало замерзания грунта происходило при температуре ниже 0 °С, в интервале  $-(0,3-1,0)$  °С, и почти вся влага (70–100 %) в массиве переходит в лед. В действительности основание ледового поля можно подразделить на искусственное, устроенное в процессе строительства, и на естественное. Искусственный слой по глубине составляет около 1 м, а под ним располагается естественный грунт. Естественный грунт – гетерогенная многокомпонентная система, состоящая в основном из органоминеральной массы, поровых растворов и поровых газов. Поэтому промерзание грунта происходит постепенно в температурном диапазоне от  $-0,2$  до  $-20$  °С. В данном температурном диапазоне плавно изменяется льдистость грунта  $i$ . При решении дифференциального уравнения теплопроводности это явление учитывалось через источниковый член, следующим образом:

$$Q = lm \frac{\partial i}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где  $Q$  – источник теплоты за счет фазовых переходов грунтовой влаги, Вт/м<sup>3</sup>;  $l$  – теплота фазового перехода, Дж/кг;  $m$  – масса влаги, кг;  $i$  – льдистость грунта;  $T$  – температура, °С;  $\tau$  – время, с.

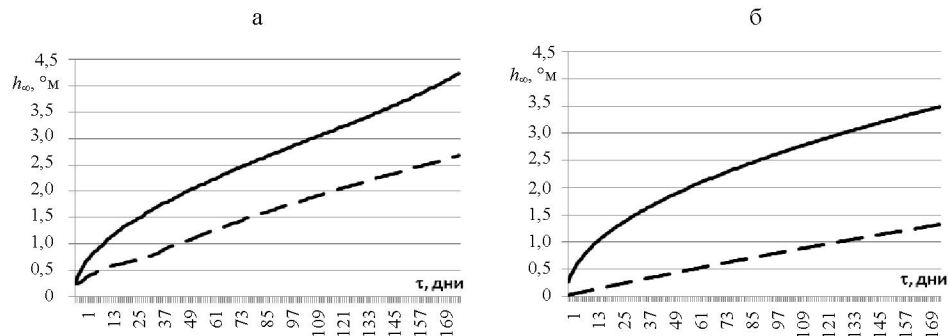


Рис. 6. Глубина промерзания грунта при наличии и отсутствии теплоизоляционного слоя под центром катка: а – результаты получены путем решения дифференциальных уравнений теплопроводности; б – то же на основе методики [1]: --- – основание со слоем теплоизоляции; — – то же без слоя теплоизоляции

Результаты численного моделирования температурного режима поверхности ледового поля на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности сравнивались с результатами измерений (с помощью тепловизионной съемки) распределения температур по поверхности

ледового поля при одинаковых конструктивных и режимных условиях эксплуатации ледового катка. Измерения проводились на ледовом поле Минского ледового дворца спорта. Данное сравнение показало, что рассчитанные и измеренные значения температур над обратным трубопроводом системы охлаждения полностью совпали, а над подающим трубопроводом различались на 0,25 °С.

### ВЫВОД

Исследование процессов формирования температурного режима ледовых полей является актуальной и важной задачей. Решить ее можно на основании применения современных математических методов исследования, которые дают достоверные результаты во многих областях науки и техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по проектированию инженерного оборудования искусственных катков (хладотехническая часть). – Л.: ЛЕНЗНИИЭП, 1972. – 100 с.
2. Правила ИИХФ по строительству и эксплуатации катков. Международная федерация хоккея на льду (ИИХФ).
3. Ice rinks. ASHRAE Handbook 2002 Refrigeration, 2002. – 11 с.
4. Физкультурно-спортивные залы. СП 31-112-2007. Ч. 3: Крытые ледовые арены. – М., 2007. – 139 с.
5. Дячек, П. И. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 2. – С. 41–47.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 05.05.2010

УДК 005.6

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ «ШЕСТЬ СИГМА»

**Инженеры ЛЕСУН Б. В., УЛАСЮК Н. Н., ПАЦЕЙ Н. Е.**

*Белорусский национальный технический университет*

«Шесть сигма» – это инновационная система менеджмента качества, основанная на совершенствовании процессов через поиск и исключение причин ошибок или дефектов в производственных процессах с учетом критически важных для потребителя выходных параметров [1–6], вовлекающая всех сотрудников от нижнего уровня до высшего звена.

Сигма ( $\sigma$ ) – это статистический термин, параметр измерения, который также называют среднеквадратическим (стандартным) отклонением. Эта буква, используемая на предприятии или в бизнесе, указывает число дефектов (брака) на выходе технологического процесса и помогает понять, насколько данный процесс отличается от совершенного.