

“СВЕРХСКОЛЬЗКИЙ” ЛЕД ДЛЯ КОНЬКОБЕЖНОГО СПОРТА

А.В. Шавлов, А.А. Рябцева*, В.А. Шавлова**

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, shavlov@ikz.ru

** Тюменская государственная медицинская академия, 625026, Тюмень, ул. Одесская, 54, Россия*

*** Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия*

В крытом конькобежном центре в Крылатском (Москва) с помощью эффективных экспериментальных экспресс-методик выполнены измерения прочности льда методом ударного разрушения, распределения прочности по толщине ледового покрытия путем сверления, структурной однородности льда по толщине по оптической прозрачности, исследования влияния термомеханической обработки льда на прочность и коэффициент трения. Установлены вероятные причины низкой скользкости ледового покрытия в конькобежном центре. Даны рекомендации приготовления “сверхскользкого” льда двухслойной структуры. Нижний толстый слой льда предельно высокой прочности получают при низкой скорости кристаллизации с последующим отжигом и механической обработкой. Верхний тонкий слой “сверхскользкого” льда готовят с высокой концентрацией структурных дефектов путем замораживания воды, содержащей специально растворенные ингредиенты. Новое ледовое покрытие, изготовленное в соответствии с этими рекомендациями, показало свои “сверхскользкие” качества на международном чемпионате юниоров в декабре 2004 г. и чемпионате мира по многоборью в скоростном беге на коньках в феврале 2005 г.

Лед, прочность, коэффициент трения, скольжение

PRODUCTION OF “SUPERSLIPPERY” ICE FOR SKATING

A. V. Shavlov, A. A. Rjabtseva*, V. A. Shavlova**

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, shavlov@ikz.ru

** Tyumen State Medical Academy, 625026, Tyumen, Odeskaya str., 54, Russia*

*** Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia*

The effective experimental express methods for the evaluation of the strength of ice at the skating stadium “Krylatskoe” in Moscow are developed: an impact destruction technique, a drilling-strengthen technique, ice optical transparency method, friction factor measurement. The probable reasons of low slippery of ice at the skating stadium “Krylatskoe” are established. The recommendations for the production of “superslippery” ice of a two-layer structure are offered. The lower thick layer of ice of maximum possible strength is produced at a low crystallization speed with consequent annealing and mechanical treatment. The upper layer of “superslippery” ice is prepared from the water containing specially dissolved impurities. The new ice cover welded by the offered technology has shown the “superslippery” qualities during the international junior championship in December, 2004 and world championship of high-speed skating in February, 2005.

Ice, strength, friction factor, sliding

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы между крытыми конькобежными центрами идет активное негласное соревнование за первенство в количестве установленных мировых рекордов. Чем больше рекордов установлено на конкретном катке, тем он престижнее, тем выше шансы выиграть право на проведение крупнейших международных соревнований. В связи с этим к индустрии разработки методов получения “сверхскользкого” льда подключены значительные научные и инженерные силы. Несмотря на то что опубликовано большое количество работ по изучению коэффициента трения льда [Bowden et al., 1964; Tushima, 1976; Tushima et al., 1998; Tushima, 1999; Gemser et al., 1999], их анализ показывает недостаточную изученность способов эффективного воздействия на скользкость льда и

необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований.

По заказу дирекции Крытого конькобежного центра (ККЦ) в Крылатском нами совместно с ГП “Холодильно-инженерный центр” (Москва) выполнены исследования физико-механических свойств льда с целью выработки узкого перечня эффективных рекомендаций по увеличению его скользкости, а также получения “сверхскользкого” льда к чемпионату мира по многоборью в скоростном беге на коньках в феврале 2005 г. [Шавлов и др., 2005].

Исследования проводили на ледовом покрытии ККЦ, приготовленном в сентябре 2004 г. финской компанией “Элмек”. При жестком графике эксплуатации катка традиционные методы испы-

тания, требующие длительного времени измерения и больших объемов льда, оказались мало приемлемыми. Поэтому были использованы известные и вновь разработанные экспресс-методики измерения с минимальной продолжительностью и без изъятия из ледового тела катка значительных объемов льда.

ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА ПРИ УДАРНО-РАЗРУШАЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Одной из эффективных методик, позволяющих оценить прочностные свойства льда, является методика, основанная на ударно-разрушающем воздействии. Использованное нами устройство для ее реализации включало наклонный желоб под углом 45° к поверхности льда и стальной шарик массой 134 г и диаметром 32 мм. Шарик скатывался с высоты 1 м с нулевой начальной скоростью по наклонному желобу. При ударе о лед шарик оставлял на его поверхности отпечаток в виде лунки глубиной менее 1 мм, окруженной бортиком вытесненного из лунки раздробленного льда. После удара шарик отскакивал на небольшую высоту и вновь ударялся о лед на некотором расстоянии от места первого соударения. Мы определили чувствительность таких параметров, как длина отскока шарика (расстояние между первой и второй точками соударения) и диаметр первого отпечатка, к температуре льда и способам его обработки.

Длину отскока регистрировали с помощью линейки с ценой деления 1 мм. Во время каждого испытания определяли температуру поверхности льда. Для этого использовали дифференциальную медьконстантановую термопару, опорный спай которой термостатировали в дьюаре с тающим льдом. Абсолютная погрешность определения температуры не превышала 1°C . Дополнительно температуру регистрировали пирометрическим термометром с ценой деления шкалы 1°C .

На рис. 1 приведена температурная зависимость длины отскока шарика от поверхности льда.

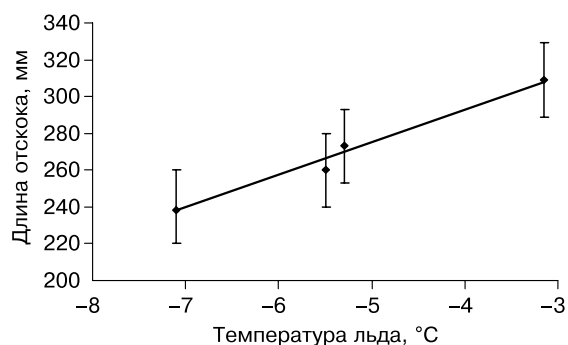


Рис. 1. Зависимость длины упругого отскока шарика от температуры льда.

Каждое значение длины отскока определяли усреднением не менее 10 результатов измерений. Различные значения температуры льда были получены путем выбора соответствующих зон на катке с разной температурой. Из рис. 1 следует, что длина отскока увеличивается примерно на 20 % при повышении температуры льда с -7 до -3°C . На первый взгляд, такое поведение противоречит известному из литературы факту снижения модуля упругости термодинамически равновесного льда с увеличением температуры [Богородский, Гаврило, 1980]. По нашему мнению, поведение кривой определяется не температурной зависимостью модуля упругости льда, а различным характером разрушения участков льда, длительное время (около месяца после приготовления) находящихся в разных термодинамических условиях. Участки льда, длительно пребывающие при более высоких температурах, содержат меньшее количество неравновесных структурных дефектов, в частности, имеют меньшую плотность дислокаций и микротрещин благодаря рекристаллизации и заживлению дефектов [Богородский, Гаврило, 1980; Шавлов, 1996], и поэтому при ударе разрушаются на более крупные фрагменты по сравнению с низкотемпературными участками льда, где плотность дефектов выше. Упругая энергия, возвращаемая шариком осколками льда, как будет показано ниже, пропорциональна размеру осколков. Вследствие этого длина отскока шарика от высокотемпературных участков льда выше, чем от низкотемпературных. Данное объяснение будет обосновано численно. Следует отметить, что величина упругой энергии, возвращаемой шариком, ничтожно мала по сравнению с энергией удара, поскольку высота отскока шарика не превышала нескольких миллиметров, в то время как высота, с которой шарик скатывался, составляла 1 м, т. е. практически вся энергия (более 99 %) расходовалась на разрушение льда. Ниже также будет показано, что подавляющая часть энергии тратится на пластическую деформацию льда при образовании и росте трещин.

Исходя из поставленной задачи поиска эффективных способов воздействия на механические свойства льда, нами исследовано влияние термообработки и термообработки с последующей механической обработкой льда на длину отскока шарика. Эффективность применения термомеханической обработки по отношению к некоторым видам льда, а именно к аморфному и свежеприготовленному поликристаллическому, ранее продемонстрирована в работе [Шавлов, 1996].

Длину отскока шарика измеряли при температуре поверхности льда -4°C . Термообработку льда перед измерениями проводили воздушным феном мощностью 600 Вт. Длительность обработки составляла 5 мин/м². После термообработки выжидали время (около 10 мин), необходимое

для релаксации температуры поверхности к первоначальному значению. Механическая обработка поверхности льда заключалась в прикладывании к нему нагрузки массой 100 кг через фторопластовый цилиндр диаметром 60 мм. Давление на лед достигало 0,3 МПа (более чем в 10 раз ниже известного из литературы предела прочности льда при сжатии при той же температуре). Время приложения нагрузки составляло 10 мин.

Из рис. 2 следует, что после термообработки длина отскока шарика от поверхности возрастает на 6–7 % и увеличивается до 13–14 %, если дополнительно применить механическую обработку. Данная зависимость может иметь следующее объяснение. В процессе термообработки, а также термомеханической обработки льда происходит ускоренная рекристаллизация, залечивание многочисленных трещин и царапин, по крайней мере в поверхностном слое толщиной около 1 мм, с которым взаимодействует шарик. В результате плотность трещин уменьшается и размер фрагментов, на которые разрушается лед, возрастает. При этом больше энергии запасается в упругой деформации осколков, длина отскока шарика увеличивается.

На рис. 3 приведена зависимость длины отскока шарика от длительности механической обработки льда. Температура поверхности льда при измерениях составляла -4°C . Видно, что с ростом времени механической обработки длина отскока шарика от обработанной поверхности возрастает. Это также можно объяснить эффектом залечивания трещин и дефектов решетки льда в процессе механической обработки.

Таким образом, мы установили, что длина отскока шарика от поверхности льда чувствительна к температуре льда, а также к его термо- и термомеханической обработке. Полученные новые данные имеют важное значение для выработки рекомендаций по модификации механических свойств ледового покрытия в ККЦ в Крылатском в направлении увеличения скользкости его поверхностного слоя.

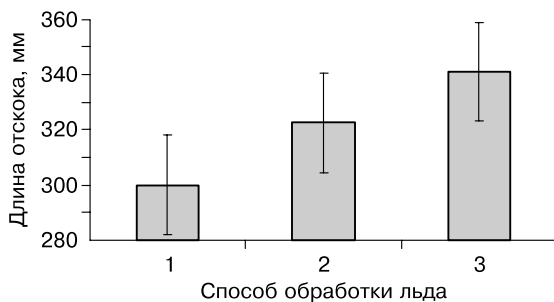


Рис. 2. Влияние термомеханической обработки на длину упругого отскока шарика.

Способ обработки льда: 1 – необработанный лед, 2 – термообработанный, 3 – термомеханически обработанный лед.

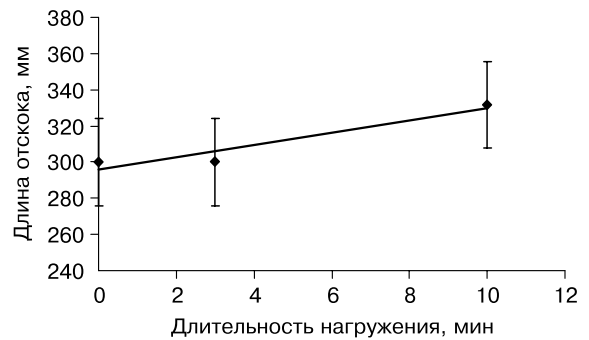


Рис. 3. Влияние длительности приложения нагрузки на длину отскока шарика.

Большинство известных методик по ударному разрушению льда [Богородский, Гаерило, 1980] предполагает определение объема разрушения и вычисление удельной энергии разрушения (по отношению энергии удара к объему разрушения) в качестве меры прочности льда. Нами была оценена прочность льда в ККЦ в Крылатском по площади отпечатка шарика на льду. Выявлена чувствительность площади отпечатка к температуре льда и способам его обработки.

Точность измерения площади отпечатка на льду тесно связана с адекватностью визуализации отпечатка. Удачным оказался способ визуализации с помощью тонкой алюминиевой фольги (менее 100 мкм толщиной), которую расстилали на поверхности льда перед ударом. Отпечатки после удара фотографировали и обрабатывали на компьютере. Фотография типичного отпечатка на льду дана на рис. 4.

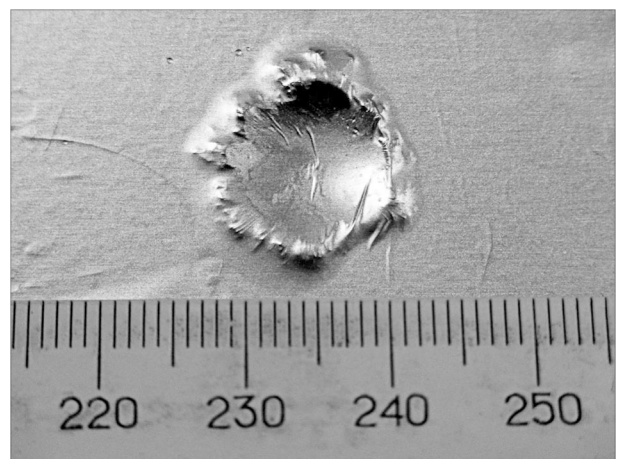


Рис. 4. Типичный отпечаток шарика на фольге на льду.

Следует отметить, что характер разрушения льда, покрытого металлической фольгой, несколько отличается от разрушения в случае свободной поверхности, что проявляется в значении длины отскока шарика. Длина отскока от поверхности, покрытой фольгой, выше примерно на 10 %. Это можно объяснить тем, что фольга удерживает кусочки разрушенного льда в области отпечатка, не дает им выкрашиваться наружу и уносить часть упругой энергии. Альтернативным объяснением могло бы быть наблюдаемое в опыте снижение температуры льда под фольгой на 1–2 °С вследствие отражения фольгой радиационного излучения и, как результат, известное увеличение модуля упругости льда. Но данное снижение температуры может привести к повышению модуля упругости всего на 1 %, а не на 10 %, как в опыте.

Площадь отпечатка вычисляли по его фотографии с помощью программы Adobe Photoshop 7.0. Эта программа позволяет рассчитывать площадь выделенного участка фотоснимка при помощи инструмента гистограмм. Типичное значение площади отпечатка составило около 80 мм² при температуре –6 °С.

Исходя из значений площади S отпечатка определена удельная энергия разрушения ω по формуле

$$\omega = \frac{\text{энергия}}{\text{объем}} = \frac{60mgh}{14\pi l(l^2 + 3S/\pi)} \cos^2 \alpha,$$

где m – масса шарика; g – ускорение свободного падения; h – высота желоба; α – угол наклона желоба к нормали; $l = D/2 - \sqrt{D^2/4 - S/\pi}$ – глубина проникновения шарика в лед; D – диаметр шарика. Формула получена в предположении, что потенциальная энергия шарика при скатывании по желобу переходит в кинетическую энергию его поступательного и вращательного движений. Нормальная составляющая поступательной энергии далее расходуется на разрушение льда. Затратами энергии на остаточную и упругую деформации шарика пре-

небрегали, так как предел прочности, предел текучести и модуль упругости стали в десятки раз превышают эти параметры для льда.

Удельная энергия разрушения составила $\omega = 14$ МДж/м³ при $g = 9,8$ м/с², $\alpha = 45^\circ$, $h = 1$ м, $m = 0,134$ кг, $S = 80 \cdot 10^{-6}$ м², $D = 32 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 0,82 \cdot 10^{-3}$ м. Предел прочности льда при сжатии при некоторых допущениях равен удельной энергии разрушения. Чтобы показать это, рассмотрим процесс разрушения льда шариком в последние моменты времени перед его остановкой. В момент остановки напряжение, создаваемое шариком во льду, равно пределу прочности σ льда:

$$\sigma = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{m dv/dt}{S}.$$

Скорость шарика v в некоторый момент перед остановкой оценим из равенства его кинетической энергии $mv^2/2$ и энергии разрушения $\omega Sx = \omega Stv/2$, где x и t – расстояние и время до полной остановки шарика. Получим $v = \omega St/m$. Вычислим dv/dt и определим предел прочности: $\sigma = \omega$. Главным предположением при выводе последней формулы явилась независимость удельной энергии разрушения от скорости шарика. Таким образом, предел прочности льда равен удельной энергии разрушения и составляет $\sigma = 14$ МПа. Полученное значение не противоречит известным литературным значениям предела прочности льда при сжатии с учетом масштабного эффекта прочности [Богородский, Гаврило, 1980].

Опыты показали, что площадь отпечатка зависит от температуры льда. Ее величина на высокотемпературном участке льда (например, при температуре –3 °С) примерно на 10 % больше площади отпечатка на низкотемпературном участке (–7 °С).

Площадь отпечатка чувствительна к термо- и термомеханической обработке льда (рис. 5). При измерениях температура льда составляла –5 °С. Из рис. 5 следует, что площадь отпечатка увеличивается (примерно на 10 %) после термообработки и еще более возрастает (до 20 %) после термомеханической обработки. Повышенные значения площади отпечатка на высокотемпературном льду, а также подвергнутом предварительной термо- и термомеханической обработке льду можно объяснить тем, что в таком льду ниже плотность трещин и выше размер осколков, на которые он разрушается. Общая же поверхностная площадь разрушения (поверхностная площадь осколков) должна остаться неизменной за счет неизменной энергии удара. Это может быть достигнуто путем увеличения объема разрушенного льда. Данный вывод о характере разрушения согласуется с выводом, полученным при исследовании длины отскока шарика. Другой важный вывод состоит в том, что термо- и термомеханически обработанный лед будет

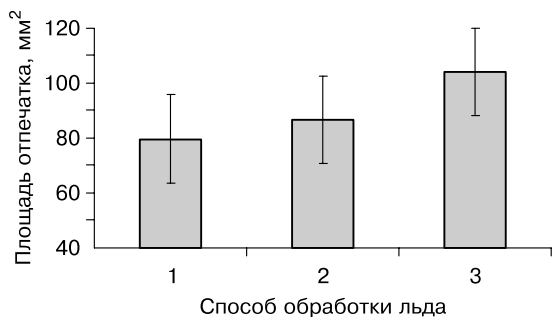


Рис. 5. Влияние способа обработки льда на площадь отпечатка шарика.

Обозн. см. на рис. 2.

разрушаться при более высоких нагрузках, чем необработанный. Необработанный лед начнет разрушаться раньше, поскольку для появления первого осколка льда из-за меньшей поверхностной площади осколка требуется меньшая энергия.

Для численного обоснования предложенных выше объяснений экспериментальных результатов выполним оценку среднего размера осколков льда и упругой энергии, запасаемой осколками. Мы ожидаем, что упругая энергия осколков будет сравнима с наблюдаемой в эксперименте энергией упругой отдачи льда шариком. Средний размер осколков вычислим по формуле

$$d = 3V/s,$$

где коэффициент 3 означает, что на каждый осколок (кубической формы для простоты) в среднем приходится половина из шести, ограничивающих его трещин; $V = \pi l(l^2 + 3S/\pi)/6$ – объем разрушенного льда, равный объему шарового сегмента; $s = W/G$ – общая площадь трещин, возникающих при ударе льда шариком; $W = (10/14)mgh \cos^2 \alpha$ – энергия удара; G – энергия образования единицы площади трещины.

Для самых хрупких материалов при растяжении выполняется неравенство $G > Eb$, где E – модуль Юнга; b – межатомное расстояние [Штремель, 1997]. Для льда при температуре, близкой к температуре плавления, когда пластичность велика, энергия G может быть в десятки раз выше. Кроме того, это значение следует увеличить еще в 5–7 раз, так как прочность льда на сжатие в 5–7 раз превышает прочность на растяжение. Для льда при сжатии получим $G \approx 10.7Eb = 210 \text{ Дж/м}^2$, где $E = 10^{10} \text{ Па}$; $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Значение удельной энергии образования трещины более чем в 10^3 раз отличается от поверхностной энергии границы раздела лед–пар, равной $0,109 \text{ Дж/м}^2$. Следовательно, основная доля энергии удара шарика о лед тратится на пластическую деформацию при образовании и росте трещин, а не на образование свободной поверхности льда.

Расчет дает не противоречащий опыту средний размер осколков льда, равный долям миллиметра: $d = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Обратный квадрат этой величины, представляющий по физическому смыслу поверхностную плотность трещин N , равен $N = d^{-2} = 5 \cdot 10^8 \text{ 1/м}^2$. Трещины возникают в местах пересечения дислокаций, поэтому величина N может служить оценкой плотности дислокаций во льду. Для сравнения приведем известное значение плотности дислокаций в леднике Менденхолл на Аляске, равное $2 \cdot 10^8 \text{ 1/м}^2$ [Богородский, Гаврило, 1980] и весьма близкое к полученному нами. В лабораторных условиях можно вырастить лед с меньшей плотностью дислокаций, составляющей 10^6 1/м^2 .

Энергию упругой отдачи льда шариком определим с помощью формулы $W_{\text{упр}} = uS_0d$ через размер осколков d (осколки расположены под шариком в один слой), суммарную площадь контакта S_0 осколков с шариком и плотность упругой энергии u . Плотность упругой энергии определяется выражением $u = \sigma^2/(2E)$. В качестве напряжения σ здесь нельзя использовать найденный выше предел прочности льда. Этот предел относится ко льду размером около 10^{-2} м (размер отпечатка шарика). Для малых объектов, в которых низка вероятность существования дислокаций (по-видимому, осколки льда представляют собой такие объекты), прочность приближается к теоретическому пределу $\sigma = E/12$ [Штремель, 1997], примерно в 50 раз превышающему прочность массивных образцов. Очевидно, что площадь контакта шарика с осколками должна быть во столько же раз меньше площади отпечатка шарика, т. е. $S_0 \approx S/50$. Получаем $W_{\text{упр}} = ESd/(15 \cdot 10^3) = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$. Такая упругая энергия соответствует высоте отскока шарика $h_0 = W_{\text{упр}}/(mg) = 2 \text{ мм}$. Наблюдаемая в опыте высота отскока при вертикальном бросании шарика составляет 1–3 мм. Полученные оценки весьма приближенны, тем не менее они свидетельствуют о допустимости предложенной выше интерпретации экспериментальных результатов.

Расчет показывает, что при высоте отскока 2 мм от поверхности льда длина отскока при скатывании по желобу при заданном угле наклона должна составлять около 50 мм. В опытах, как мы видели, длина отскока равнялась 200–300 мм. Причина этого различия, согласно численным оценкам, заключается в том, что шарик отскакивает не от плоской поверхности, а из лунки глубиной около 1 мм. Имея горизонтальную составляющую скорости, шарик при движении по горизонтали отталкивается от края лунки и приобретает дополнительную вертикальную скорость. В результате длина отскока L возрастает. Она выражается соотношением

$$L = v_x(v_0 + v_1)/g,$$

где $v_x = (gh \cdot 10/7)^{0,5} \sin \alpha = 2,6 \text{ м/с}$ – горизонтальная составляющая скорости шарика; $v_0 = (2gh_0)^{0,5} = 0,14 \text{ м/с}$ – скорость упругого отскока шарика; $h_0 = 2 \text{ мм}$ – высота упругого отскока; $v_1 = 2v_x(S/\pi)^{0,5}/D = 0,8 \text{ м/с}$ – дополнительная вертикальная скорость при отталкивании шарика от края лунки, зависящая от площади отпечатка.

Таким образом, длина отскока на 15 % определяется величиной v_0 , а на 85 % – величиной v_1 . Изменение же длины отскока, например, увеличение на 20 % при повышении температуры льда с -7 до $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1), на четверть определяется увеличением скорости v_1 , а на три четверти – ростом v_0 . Согласно опыту, площадь отпечатка при повышении температуры льда с -7 до $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ возрастает на

10 %. Поэтому скорость v_1 возрастает на 5 %, что обеспечивает увеличение длины отскока на четверть от полного ее увеличения. Для того чтобы изменение v_0 привело к изменению длины отскока на остальные три четверти, скорость v_0 должна увеличиться в 1,5–2 раза. Последнее означает, что на высокотемпературных участках льда размер фрагментов разрушения должен быть в 1,5–2 раза больше, чем на низкотемпературных участках. Во столько же раз должен быть больше и объем разрушаемого при ударе льда. В опыте же объем разрушения увеличивается только на 20 %. Полученное численное разногласие может свидетельствовать о том, что удельная энергия образования трещины не остается неизменной при увеличении температуры льда, а возрастает. Это, впрочем, не противоречит общефизическим представлениям: при высоких температурах вещество становится более пластичным, и поэтому глубина слоя пластического течения под трещиной возрастает, а вместе с ней увеличивается удельная энергия образования трещины [Штрель, 1997].

ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА СВЕРЛЕНИЕМ

Эксперименты по ударному разрушению льда шариком позволили получить информацию о прочности льда в тонком поверхностном слое (толщиной около 1 мм). Для изучения распределения прочности по глубине ледяного массива катка вначале предполагалось последовательно срезать слои льда толщиной по 5–10 мм вплоть до бетонного основания и проводить испытания на прочность в каждом слое. Но впоследствии от этих опытов отказались, так как они требовали извлечения из ледяного массива большого количества материала на значительной площади (около 2 м²), что несомненно повлияло бы на режим эксплуатации стадиона. Нами было предложено исследовать распределение прочности льда по глубине путем его сверления. При этом мы не рассчитывали на

получение распределения абсолютных значений предела прочности, но лишь на выявление качественной характеристики, приближенно отражающей поведение прочности.

Устройство для сверления было изготовлено на основе электрической дрели, которая устанавливалась на вертикально-подвижном креплении. Ее нагружали гирей массой около 2 кг. Сверло предварительно охлаждали до температуры льда. Под действием силы тяжести и при вращении сверло, закрепленное в патроне дрели, проникало в лед. Скорость проникновения тем выше, чем ниже прочность льда. В экспериментах применялись сверла диаметром 10 мм двух видов: с конусным наконечником (сверло по металлу), сверло с режущими выступами по краям (сверло по дереву). Наилучшая чувствительность предложенной методики к прочности льда оказалась в экспериментах со сверлом с конусным наконечником.

Устройство было оснащено подвижным указателем положения сверла и неподвижной линейкой. В процессе сверления производили видеосъемку движения указателя относительно линейки с помощью видеокамеры SONY DSR-TRV345E. Полученные видеозаписи для обработки вводили в компьютер через стандартный интерфейс, по ним определяли положение сверла в различные моменты времени. Точность определения времени и положения составила 0,04 с (период кадров) и 0,5 мм (половина цены деления линейки) соответственно.

На рис. 6 представлены три экспериментальные зависимости глубины проникновения сверла в лед от времени по результатам трех сверлений на расстоянии 10–15 см друг от друга в центре ледового стадиона. Сверление выполнено на всю глубину льда, вплоть до бетонного основания. Продолжительность первых двух опытов, как видно из рис. 6, примерно одинакова по величине, а продолжительность третьего почти вдвое больше. Это связано с тем, что при третьем сверлении из-за

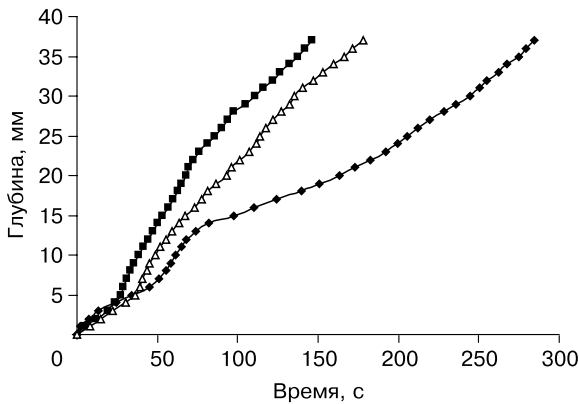


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения сверла в лед от времени (результаты трех опытов).

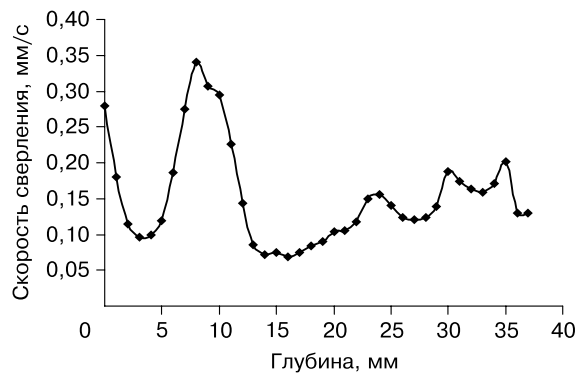


Рис. 7. Зависимость скорости сверления от глубины погружения в лед.

люфта в вертикально-подвижном креплении сверло несколько отклонилось от нормали к поверхности льда, и процесс из-за трения сверла о стенки отверстия шел с меньшей скоростью. По всем кривым видно, что процесс сверления протекает неравномерно по глубине. Неравномерность сверления хорошо видна на графике зависимости скорости сверления от глубины (рис. 7), полученном путем усреднения всех кривых рис. 6 и дифференцирования по времени результата усреднения. В начале процесса скорость сверления высокая. На глубине 4–5 мм она падает в 3 раза, затем трехкратно возрастает на глубине 10 мм; на глубине 15 мм скорость снова уменьшается примерно в 5 раз и далее медленно увеличивается, проходя через ряд невысоких максимумов. Иными словами, лед имеет низкую прочность в поверхностном слое толщиной 3 мм и прослойку толщиной 5 мм с низкой прочностью на глубине 10 мм.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ ЛЬДА

Существование прослоек непрочного льда можно подтвердить визуальным изучением образцов, взятых из ледового массива стадиона. Методика получения образцов льда проста. Она заключается в выплавлении образца льда цилиндрической формы с помощью отрезка стальной трубы длиной 150 мм и диаметром 30–60 мм. Отрезок трубы нагревали в горячей воде, вертикально ставили на лед и сверху нагружали. В местах контакта с трубой лед плавился, отрезок трубы погружался в массив на 2–3 мм. Воду из места плавления откачивали с помощью шприца. Трубу снова нагревали в воде и процесс плавления повторяли многократно до достижения основания ледяного массива. Затем образец льда извлекали на поверхность. На выплавление образца льда длиной 50 мм требовалось около 5 мин.

На рис. 8 представлена фотография образца льда, изъятая в центре стадиона. Образец изображен в нормальном положении. Глубина увеличивается в направлении сверху вниз. Из рисунка видно, что образец состоит из слоев непрозрачного и прозрачного льда. Эти слои, очевидно, сформировались в результате неравномерного намораживания льда, непостоянства химического состава используемой воды и наличия растворенных в ней газов, разного возраста слоев льда, особенностей эксплуатации ледового покрытия в различные промежутки времени. Из сравнения фотографии с графиком скорости сверления (см. рис. 7) следует, что наиболее прочным является прозрачный лед, содержащий минимальное количество воздушных включений, царапин, трещин, химических примесей. Из ледового покрытия было изъято пять образцов льда в разных точках стадиона. Все образ-

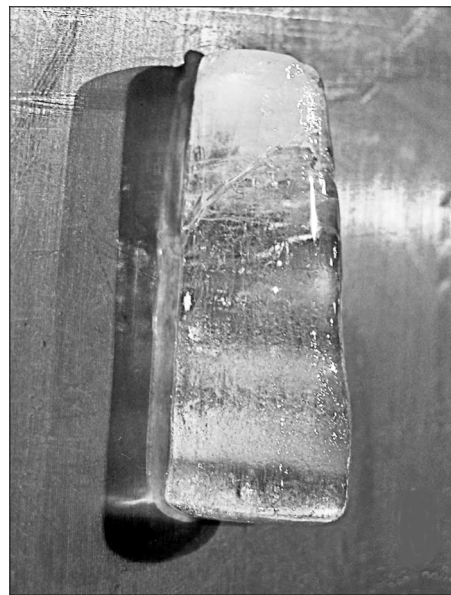


Рис. 8. Образец льда, изъятый в центре стадиона.

цы имели выраженную слоистую структуру, свидетельствующую о том, что лед на стадионе неоднороден по структуре и не оптимален по прочностным характеристикам. Для упрочнения ледяного массива необходимо выполнить комплекс мероприятий по термо- или термомеханической обработке льда либо удалить верхний непрочный слой толщиной около 10 мм, оставив прочный нижний. Далее будет показано, что упрочнение льда – важный фактор увеличения его скользкости.

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ЛЬДА

При экспериментальном исследовании коэффициента трения льда традиционно используют салазки, которые запускают в свободное скольжение по льду с некоторой начальной скоростью. По начальной и конечной скорости, времени скольжения и пройденному пути вычисляют ускорение торможения и коэффициент трения. Для достижения нагрузки на лед, близкой к нагрузке, оказываемой конькобежцем, нами были изготовлены салазки из двух стандартных беговых коньков, прикрепленных к массивной текстолитовой плите параллельно друг другу на расстоянии 30 см. Масса салазок 10 кг, дополнительно их нагружали массой 90 кг. Для исследования коэффициента трения требовалась ледяная дорожка длиной 4 м и шириной 0,6 м. С одной стороны дорожки помещали 4-метровую линейку. На салазки был установлен штатив с видеокамерой. В ходе эксперимента са-

лазки с небольшой скоростью запускали по ледяной дорожке, так чтобы линейка находилась в кадре видеокамеры. Полученный видеофильм обрабатывали с помощью компьютера. В каждом кадре определяли текущую координату и время, по которым вычисляли скорость и ускорение. Коэффициент трения μ рассчитывали по формуле

$$\mu = a/g,$$

где a – модуль среднего ускорения движения салазок по льду; g – ускорение свободного падения. В ряде случаев определяли начальную скорость V_0 и время t движения салазок до полной остановки, при этом ускорение a определяли по формуле $a = V_0/t$.

Коэффициент трения изучали на участках льда разной температуры. Положение экспериментальных точек в зависимости от температуры аппроксимировали линией тренда, которая проходила через минимум вблизи -7°C . Такое поведение коррелирует с U-образной температурной зависимостью коэффициента трения льда с минимумом вблизи -7°C , установленной факультетом Human Movement Sciences Независимого университета в Амстердаме [Gemser et al., 1999]. Оно объясняется тем, что, с одной стороны, при повышении температуры увеличивается толщина жидкой прослойки между коньком и льдом, и поэтому трение уменьшается, а с другой – при высоких температурах конек начинает врезаться в лед, и вследствие увеличения лобового сопротивления льда трение возрастает.

Среднее значение коэффициента трения на льду в Крылатском, по многочисленным (около 100) измерениям, составило 0,009. Это примерно в 1,5–2 раза больше лучших значений коэффициента трения, описанных в литературе [Gemser et al., 1999]. Таким образом, скользкость льда на катке не является предельно высокой и может быть улучшена.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАМОРАЖИВАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ЛЬДА

Цель данных экспериментов – установить влияния структуры льда (дефектности) на коэффициент трения. Известно, что лед, получаемый при высокой скорости кристаллизации, содержит гораздо большее количество структурных дефектов, чем при низкой скорости [Шавлов, 1997, 1998]. Для получения различных скоростей кристаллизации мы использовали воду разной начальной температуры. На штатный лед, подготовленный льдуборочной машиной “Олимпия”, наносили тонкий слой воды заданной температуры в количестве $0,25 \text{ л/м}^2$ путем распыления ее из пульверизатора. При низкой температуре воды кристаллизация протекает быстро, капельки воды замерзают, не ус-

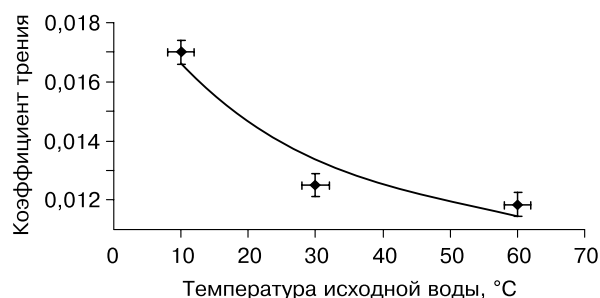


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения льда при температуре -5°C от температуры воды, из которой получен лед.

пев растечься по поверхности. Поверхность льда получается шероховатой. При высокой температуре воды кристаллизация протекает медленнее, поверхность льда ровнее. В экспериментах использовалась специально очищенная вода, в частности, прошедшая очистку обратноосмотическим фильтром и деаэрацию. Измерения коэффициента трения выполняли спустя 10 мин после образования слоя льда.

На рис. 9 приведена зависимость коэффициента трения льда от температуры воды, из которой получали лед. При понижении температуры исходной воды коэффициент трения льда увеличивается. Данный результат можно объяснить тем, что при низкой температуре воды скорость кристаллизации велика, образуется высокодефектный, мягкий лед, в который конек врезается сильнее, при этом увеличивается лобовое сопротивление льда и растет коэффициент трения. Большему заглублению конька также способствует шероховатость поверхности льда, ярче выраженная при низкой температуре исходной воды ($+10^\circ\text{C}$). Вообще говоря, мягкий лед должен был улучшить скольжение конька, но его толщина оказалась, по-видимому, слишком большой, так что конек слишком глубоко врезался в лед, и скольжение ухудшалось. Для улучшения скольжения толщину мягкого слоя льда, вероятно, следует значительно уменьшить.

Скорость кристаллизации варьировали также с использованием ледового комбайна “Олимпия” на различных скоростях его движения при постоянной скорости налива воды на ледовую поверхность. Скорость движения измерялась в частоте оборотов двигателя – 1000, 1800, 2500 об/мин, при этом толщина наливаемого слоя воды составляла примерно 0,5, 0,3, 0,2 мм. Скорость кристаллизации тем выше, чем меньше толщина наливаемого слоя.

Зависимость коэффициента трения льда от скорости движения ледового комбайна представлена на рис. 10. Измерения проводили при темпе-

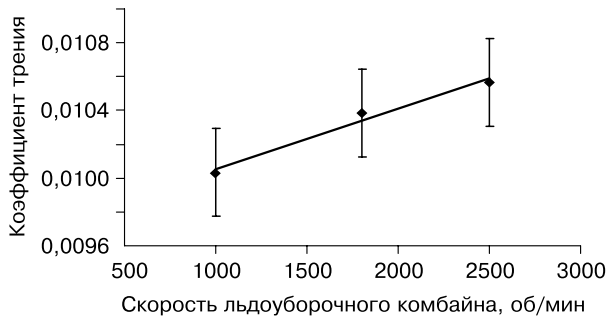


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения льда от скорости движения льдоуборочного комбайна (в оборотах двигателя).

ратуре льда -5°C спустя 1 ч после заливки комбайном. Из рис. 10 следует, что трение возрастает при увеличении скорости комбайна. Данная зависимость объясняется тем, что с ростом скорости комбайна уменьшается толщина налитого слоя воды, увеличиваются скорость кристаллизации и дефектосодержание льда, лед становится мягче, конек глубже врезается в лед, поэтому трение возрастает. Из данных экспериментов, так же как из предыдущих, следует, что толщину мягкого слоя льда необходимо делать гораздо меньше 0,2 мм, чтобы иметь шанс улучшения скольжения. Предельно тонкие мягкие поверхностные слои льда, по-видимому, получаются не при высокой, а при низкой скорости льдоуборочного комбайна. При низкой скорости толстый слой налитой воды (0,5 мм) медленно кристаллизуется снизу, лед получается прочным почти по всей толщине и лишь тончайший поверхностный слой (вероятно, толщиной в единицы–десятки микрон), в который оказываются отторгнутыми почти все примеси из

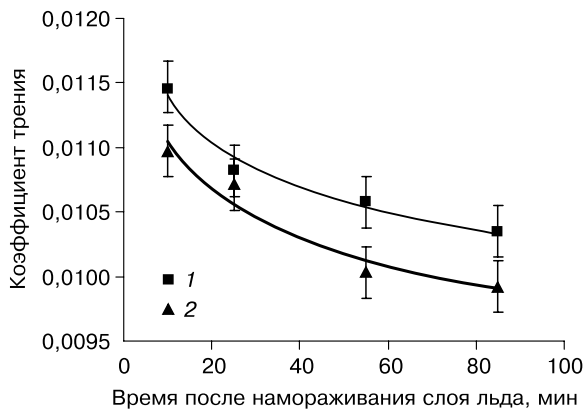


Рис. 11. Зависимость коэффициента трения от времени, прошедшего с момента намораживания льда льдоуборочным комбайном, при различных скоростях заливки:

1 – 2500 об/мин; 2 – 1000 об/мин.

объема, замерзает с максимальным содержанием дефектов, а значит, является предельно мягким. И этот лед, согласно рис. 10, получается наиболее скользким.

На рис. 11 приведена зависимость коэффициента трения от времени, прошедшего с момента заливки слоя льда комбайном “Олимпия”, при двух скоростях заливки – 2500 и 1000 об/мин, и тренды для этих значений скорости. Каждая точка является средним значением трех измерений. Трение уменьшается с течением времени. Это может быть объяснено уменьшением со временем концентрации дефектов, благодаря чему лед становится тверже и прочнее, конек меньше заглубляется и трение уменьшается. Полученные нами результаты не противоречат известным данным о том, что в первые 10 мин после заливки коэффициент трения увеличивается, а затем стабилизируется. Исследования показывают, что коэффициент трения при времени более 10 мин после заливки не остается постоянным, а несколько уменьшается.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ЛЬДА

Особый интерес представляют эксперименты по выяснению влияния различных способов предварительной обработки льда на его скользкость. Цель данных экспериментов состоит в получении способов достижения наибольшей скользкости. В одних опытах лед в течение нескольких минут нагревали воздушным феном на $1-2^{\circ}\text{C}$, в других – обрабатывали поверхность льда с высоты 30–50 см паром, получаемым с помощью парообразователя бытового утюга, в третьих – нагревали утюгом до плавления и разглаживали поверхностный слой льда.

На рис. 12 приведены средние значения коэффициентов трения при разных способах предварительной обработки льда с последующим охлаждением до начальной температуры. Обработка льда

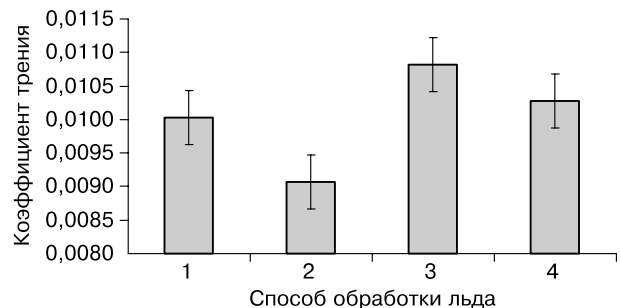


Рис. 12. Влияние способа обработки льда на коэффициент трения.

Способ обработки льда: 1 – необработанный лед, 2 – обработан воздушным феном, 3 – обработан паром, 4 – проглажен до плавления утюгом.

феном приводит к уменьшению трения конька о лед. Это объясняется тем, что данный способ обработки эквивалентен “отжигу” льда, снижающему число дефектов и увеличивающему прочность [Шавлов, 1996]. В результате конек меньше врезается в лед и легче скользит. Обработка паром и проглаживание утюгом приводят к образованию жидкого слоя и быстрой последующей кристаллизации, в результате которой формируется значительный по толщине слой дефектного, мягкого льда, в который конек легко врезается, и трение увеличивается.

Предложенные в настоящей работе интерпретации экспериментальных данных по трению конька о лед требуют численного обоснования и уточнения. Согласно современным представлениям, хорошее скольжение конька по льду достигается благодаря образованию слоя жидкой воды между трущимися поверхностями при работе сил трения [Боуден, Тейбор, 1968]. Этот слой воды действует как смазка. Оценим толщину слоя воды по формуле $d_b = \mu Mg / (2\Delta\rho\lambda)$, полученной из условия равенства работы сил трения и теплоты плавления льда в области контакта с коньком. При коэффициенте трения $\mu = 0,01$, массе салазок $M = 100$ кг, плотности льда $\rho = 917$ кг/м³, ширине полоза конька $\Delta = 2$ мм и удельной теплоте плавления $\lambda = 334$ кДж/кг получим толщину жидкого слоя $d_b \approx 10^{-5}$ м. Эта толщина всего лишь в 4–5 раз меньше среднего расстояния между дислокациями на поверхности льда и, по-видимому, сравнима со средним размером неровности (шероховатости) поверхности льда, обусловленной этими дислокациями. Таким образом, трение конька о лед при толщине жидкого слоя, сравнимой с размером неровности поверхности, относится к категории смешанного трения (переходного от сухого, когда трение определяется трибологическими характеристиками трущихся поверхностей, к жидкостному, определяемому только вязкостью жидкости).

При интерпретации ряда экспериментальных данных мы высказывали предположение о том, что вследствие высокой мягкости льда конек при движении значительно врезается в него, и лобовое сопротивление льда затрудняет скольжение. Вычислим коэффициент трения при лобовом сопротивлении льда при условии диссипации энергии в процессе его разрушения. Исходя из величины нагрузки, которую оказывают салазки на лед ($\sigma = 1$ МПа), и литературного значения скорости деформации свежеприготовленного льда при данной нагрузке – $d\varepsilon/dt = 0,03–0,01$ %/с [Богородский, Гаврило, 1980; Шавлов, 1996], получаем, что за время прохождения салазками своей длины ($t_{дв} = 0,5–1,0$ с) они погружаются в лед на глубину $d_{погр} = L_{дл}(d\varepsilon/dt)t_{дв}/100 = 10^{-5}$ м, сравнимую с толщиной жидкого слоя (где $L_{дл} = 5 \cdot 10^{-2}$ м – толщина ледяного массива). Понятно, что при лобовом со-

противлении лед должен разрушаться на осколки размером не менее $5 \cdot 10^{-5}$ м (среднее расстояние между дислокациями). Следовательно, толщина разрушаемого слоя также должна быть сравнима с данной величиной. Коэффициент трения, обусловленный потерями энергии на разрушение слоя льда толщиной $5 \cdot 10^{-5}$ м, составляет $\mu = a/g = F_{разр}/(Mg) = (dW_{разр}/dx)/(Mg) = 2\omega\Delta d_{погр}/(Mg) = 0,3 \cdot 10^{-2}$. Оцененное значение коэффициента трения составляет треть величины, наблюдаемой в опыте. Это означает, что использованные выше интерпретации экспериментальных данных в терминах лобового сопротивления льда движению конька действительно не лишены основания.

ВЫВОДЫ

Проведенные нами исследования показали следующее.

Коэффициент трения льда в ККЦ в Крылатском составляет приблизительно 0,009, что примерно в 1,5–2 раза выше рекордных его значений, известных из литературы. Высокое значение коэффициента трения обусловлено низкой прочностью льда. Прочность неодинаково распределена по толщине ледового покрытия. Наиболее низкая прочность у приповерхностного слоя толщиной около 5 мм, с которым взаимодействует конек конькобежца.

Задачей первостепенной важности в ККЦ является получение твердого, прочного льда, способствующего повышению скользкости. Нами для увеличения скользкости была предложена двухслойная модель ледового покрытия. Верхний тончайший слой – сверхмягкий – для улучшения скольжения; нижний слой – предельно твердый и прочный – для того чтобы конек не врезался.

Идея создания двухслойного льда опирается на известный феномен скользкости монокристаллического льда: известно, что лед легко сдвигается в базисной плоскости кристаллической решетки и гораздо хуже в поперечном направлении. Если создать каток из монокристаллического льда, ориентированного таким образом, что поверхность льда будет совпадать с базисной плоскостью монокристалла, то конек будет идеально скользить вдоль поверхности и не будет проваливаться в глубину. За всю историю конькобежного спорта такой каток был создан единожды в 1998 г. на олимпийском объекте Эмвейв в Нагано (Япония). Пять конькобежных дорожек были выложены пластинами монокристаллического льда, вырезанными в базисной плоскости из специально выращенных ледяных сталагмитов. Итоговые тесты показали снижение трения на сталагмитовом льду на 22 % по сравнению с обычным поликристаллическим льдом. После проведения конькобежных состязаний, на которых было установлено много новых

мировых рекордов, сталагмитовый лед был сплавлен, и больше ни на одном катке мира такой лед (вследствие больших трудозатрат и высокой стоимости) не получали.

Предлагаемые нами рекомендации по приготовлению “сверхскользкого” льда в значительной степени касаются повышения прочности нижнего толстого слоя льда в двухслойной структуре. Они заключаются в следующем:

- использование для получения льда специально очищенной воды;
- при послойной заливке массива льда удаление верхней части каждого слоя льда, обогащенной примесями;
- выполнение термомеханической обработки льда после намораживания всего массива;
- при эксплуатации льда периодическое удаление (срезание) верхнего поврежденного слоя и последующая заливка поверхности тонким слоем подогретой воды с добавлением (либо без добавления) специальных ингредиентов. Динамика изменения толщины льда за счет операций “срезание–заливка” направлена в сторону уменьшения толщины массива льда.

Технология получения “сверхскользкого” льда защищена патентом [*Способ...*, 2005]. Внедрение технологии не требует больших энергетических и трудозатрат, время ее реализации также не велико. Так, основной отличительный элемент технологии – термомеханическая обработка – требует дополнительного времени не более суток.

В соответствии с указанными рекомендациями в ноябре 2004 г. в ККЦ было приготовлено новое ледовое покрытие. Полученный лед отличался от прежнего высокой прозрачностью и скользкостью. На международном чемпионате юниоров в декабре 2004 г. на этом льду из 133 забегов в 99 случаях (74 %) были установлены личные рекорды. В командных гонках преследования установлено два мировых рекорда.

На чемпионате мира 5–6 февраля 2005 г. было также установлено два мировых рекорда. Из всех возможных личных рекордов у женщин 29,8 %, а у мужчин 13,6 % было установлено на льду ККЦ в Крылатском. Следует учесть, что участвовали сильнейшие конькобежцы мира, которые многократно стартовали в Калгари и Солт-Лейк-Сити, а также на всех других крытых катках мира. Единодушная оценка качества льда спортсменами и тренерами: “Это лучший лед в Европе,

и по абсолютным результатам каток ККЦ в Крылатском стоит на третьем месте, уступая Солт-Лейк-Сити (высота 1424 м над уровнем моря) и Калгари (высота 1035 м), где показываются более высокие результаты за счет существенного снижения аэродинамического сопротивления воздуха”.

В заключение выражаем благодарность Г.Ю. Гончаровой, Б.А. Кузнецову, А.Д. Писареву, Е.В. Артемову, Н.Н. Калущих за помощь в организации и проведении опытов. Особую признательность выражаем директору ККЦ в Крылатском М.В. Загайнову за внимание и поддержку, оказанные разработке и использованию уникальных научных методик и способов создания льда с программируемым набором свойств.

Литература

- Богородский В.В., Гаврило В.П.** Лед. Л., Гидрометеоздат, 1980, 384 с.
- Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел. М., Машиностроение, 1968, 543 с.
- Способ** производства быстрого льда: пат. 2005103415/12(004554) Рос. Федерации / Гончарова Г.Ю., Кузнецов Б.А., Загайнов М.В., Шавлов А.В. Оpubл. 10.02.2005.
- Шавлов А.В.** Лед при структурных превращениях. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1996, 188 с.
- Шавлов А.В.** Трехуровневая модель накопления дефектов в процессе роста льда из жидкой воды // Журн. структур. химии, 1997, т. 38, № 3, с. 511–515.
- Шавлов А.В.** Механизм накопления ориентационных дефектов на фронте кристаллизации воды. Разделение заряда на фазовом фронте // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 2, с. 58–64.
- Шавлов А.В., Писарев А.Д., Гончарова Г.Ю.** Наш лед – самый скользкий в Европе // Холод*ОК, 2005, июнь, с. 23–28.
- Штремель М.А.** Разрушение // Соровский образоват. журн., 1997, № 4, с. 91–98.
- Bowden F.P., Tabor D.** The friction and lubrication of Solids II. Oxford, Clarindon, 1964, 118 p.
- Gemser H., Jos. de Koning, Gerrit Jan van Ingen Schenau.** Handbook of competitive speed skating. Leeuwarden, The Netherlands, Eisma publ. eleeuwarden, 1999, 215 p.
- Tusima K.** A review on mechanisms of friction of ice // Lubrication, 1976, vol. 21, No. 5, p. 287–294.
- Tusima K.** Challenge to skating rink by an ice-stalagmite // Refrigeration, 1999, vol. 74, No. 855, p. 24–26.
- Tusima K., Kiuchi T.** Development of high-speed ice-skating rink // Seppyo. J. Jap. Soc. of Snow and Ice, 1998, vol. 60, No. 5, p. 349–356.

Поступила в редакцию
29 марта 2006 г.