



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 531.7+621.56+608.4+796.028

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

ДАВЫДОВ М.В.¹, БЕЛОУС П.А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 апреля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье представлены результаты оценки качества льда в зависимости от различных условий окружающей среды и подготовки льда. Выявлены оптимальные показатели исследуемых величин, влияющих на качество ледовой поверхности. Цель исследования – определение зависимости коэффициента трения скольжения от параметров водоподготовки, условий намораживания ледовой поверхности, ее температуры, твердости и других параметров, которые можно менять в условиях спортивной арены для конькобежного спорта и выбирать сочетание, что обеспечивает наименьший коэффициент трения скольжения. Для объективной оценки скоростных качеств льда использовали устройства, имитирующие скольжения конькобежца за счет перемещения подвижной платформы, установленной на лезвиях коньков, снабженной модулем, передающим на персональный компьютер регистрируемые значения параметров трения-скольжения коньков с ледовой поверхностью. Для измерения пройденного расстояния устройства использовался метод лазерной дальнометрии. Показана эффективность разработанного устройства и методики его применения для оценки качества льда. Рассматривается влияние температуры поверхности льда, температуры воздуха, температуры заливаемой воды, влажности воздуха на качество ледовой поверхности. Учет этих показателей при проведении соревнований позволяет создавать «быстрый» лед для демонстрации высоких спортивных результатов. Наилучшие значения дальности пробега устройства были зафиксированы при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –3,5 до –4,5 °С, температура бетонной плиты – –6 °С, толщина льда – 27–29 мм, температура заливаемой воды – 50–55 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной – 100 %. Наихудшие значения дальности пробега устройства получены при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –5,3 до –5,4 °С, температура заливаемой воды – 30–35 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной не осуществлялось.

Ключевые слова: качество льда, технологии подготовки льда, коэффициент трения скольжения, скользкость льда.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Давыдов М.В., Белоус П.А. Автоматизированное устройство для оценки качества поверхности льда. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 21-28.

AUTOMATED DEVICE FOR ICE SURFACE QUALITY ASSESSMENT

MAXIM V. DAVYDOV¹, PAVEL A. BELOUS²

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 15 April 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Results of ice quality assessment depending on various conditions of the environment and ice preparation are presented in article. The optimum indicators of the studied values influencing the ice surface quality are revealed. It is possible to estimate ice speed qualities objectively with the device, that imitates skater sliding. The purpose of the study is to determine the dependence of the sliding friction coefficient on the parameters of water treatment, the conditions for freezing the ice surface, the temperature of the ice surface, hardness and other parameters. The imitation is the movement of the mobile platform mounted on skates, supplied with the module transferring to the personal computer the values of skates sliding on the ice surface friction parameters. To measure the distance traveled by the device, the laser ranging method was used. The efficiency of the developed device and the technique of its application for assessment of ice quality on sports arenas are shown. The dependences of the quality of the ice surface on the surface temperature of the ice, air temperature, temperature of the poured water are considered. Accounting of these indicators during competitions allows to create «fast» ice for high sports results demonstration. The best values of the range of the device were recorded with the following parameters: ice surface temperature – from –3,5 to –4,5 °C, concrete slab temperature – –6 °C, ice thickness – 27–29 mm, filled water temperature – 50–55 °C, cutting the top layer of ice with an ice-filling machine – 100 %. The worst values of the range of the device were obtained with the following parameters: ice surface temperature – from –5,3 to –5,4 °C, filled water temperature – 30–35 °C, the top layer of ice was not cut by an ice-filling machine.

Keywords: ice preparation technology, ice quality, sliding friction coefficient, ice slipperiness.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Davydov M.V., Belous P.A. Automated device for ice surface quality assessment. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 21-28.

Введение

Эффективность работы спортивных комплексов сегодня во многом определяется состоянием качества льда, от которого в значительной степени зависят результаты выступлений спортсменов. В настоящее время в Республике Беларусь функционирует ряд уникальных спортивных сооружений, на которых возможно проведение крупнейших международных соревнований по всем без исключения ледовым видам спорта. Для демонстрации высоких спортивных результатов требуется очень качественный лед, обеспечить который возможно только современными технологиями подготовки ледовой поверхности.

На создание искусственного ледового покрытия толщиной 37–40 мм специалистами обычно затрачивается около 100 часов рабочего времени [1–3]. При этом качество льда зависит не только от различных специфических добавок, но и от таких параметров, как температура бетонной плиты и температура поверхности льда. На каждую дистанцию забега конькобежцев должен быть свой подбор оптимальных параметров температуры льда [4–5]. В соответствии с правилами международного союза конькобежцев установленные условия не должны меняться на протяжении тренировок и соревнований спортсменов. Состояние конькобежного льда, в отличие от хоккейного и льда для фигурного катания, оценивается результативностью спортсмена – временем прохождения дистанции.

Для демонстрации высоких спортивных результатов в скоростном беге на коньках необходимы не только технически выверенные движения, но и условия, при которых конькобежцы смогли бы превзойти свои личные и официальные рекорды. На значимых международных соревнованиях борьбу между собой ведут не только спортсмены, но и ледовые спортивные центры. У спортивных арен, так же как и спортсменов, есть свои сильные и слабые стороны, репутация и рейтинги. Каждый спортивный комплекс стремится создать качественную ледовую поверхность, которая позволит установить рекорды. В современных комплексах можно управлять температурой и влажностью воздуха, что позволяет оптимизировать скоростные свойства поверхности льда и структуру его массива. В результате этого на аренах крытых катков конькобежцы существенно улучшили свои результаты.

Для того чтобы подготовить качественный лед с заданными характеристиками, необходимо знать параметры, от которых эти характеристики зависят. Существуют исследования, в которых рассматривают, на сколько зависит трение скольжения конька от наклона плоскости лезвия, от шлифовки лезвия при одной и той же нагрузке на коньки, от заточки лезвия конька [6]. Одной из важнейших характеристик качества льда является скользкость. Известно, что скользкость льда определяют следующие параметры:

- коэффициент трения скольжения (μ);
- сила трения скольжения ($F_{\text{тр.ск}}$);
- сила сопротивления скольжению конька ($F_{\text{с.ск}}$) [7, 8].

Лед должен быть как скользким (с минимальным коэффициентом трения скольжения), так и твердым. Коэффициент трения скольжения является характеристикой процесса, поэтому его нельзя рассматривать как некоторую неизменную величину.

Также на качество льда оказывают влияние такие показатели, как: величина отклонений от плоскости ледовой поверхности; твердость льда; распределение твердости, температуры по глубине льда от поверхностного слоя до бетонной плиты; толщина льда; температура воздуха над ледовой поверхностью; влажность воздуха [9, 10].

Измерение коэффициента трения скольжения различных материалов осуществляется разными способами и приборами. Однако в случае определения коэффициента трения скольжения конька о ледовую поверхность в условиях спортивного сооружения традиционные приборы и методы измерений неприемлемы. При исследовании коэффициента трения скольжения конька о лед должны учитываться различные факторы внешней среды, влияющие на качество проводимых измерений. Это возможно при использовании специализированных аппаратно-программных средств, устанавливаемых на лезвия коньков, приводимых в движение силовым импульсом отстрелочного механизма, связанного беспроводным каналом с подвижным модулем устройства, передающим на персональный компьютер информацию, отражающую значения параметров трения скольжения коньков с ледовой поверхностью.

Методика измерений и применяемое оборудование

Состояние ледовой поверхности может существенно влиять на скорость передвижения спортсменов по дистанции. Для того чтобы не допускать ухудшения скоростных качеств льда, необходимо вести мониторинг его состояния. В этих целях авторами использовалось устройство, имитирующее скольжение конькобежца. Устройство позволяет проводить испытания с удельными нагрузками на лезвие конька, близкими к реальным нагрузкам на лед при движении спортсмена. Скользкость льда определяется на основании коэффициента трения скольжения, который рассчитывается в результате изменения дальности пробега платформы на коньках при одном и том же начальном силовом импульсе. Коэффициент трения

скольжения рассчитывался по формуле $\mu = \frac{a}{g}$, где a – среднее ускорение движения платформы

по льду; g – ускорение свободного падения, при этом ускорение a определялось по формуле

$$a = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t}.$$

Устройство для определения скользкости льда на спортивных аренах, представленное на рис. 1, состоит из двух платформ и лазерной системы, первая платформа – неподвижная,

устанавливается на ледовую поверхность, вторая – подвижная, опирающаяся на коньки и предназначенная для движения по льду под действием импульса силы, полученного от неподвижной платформы.

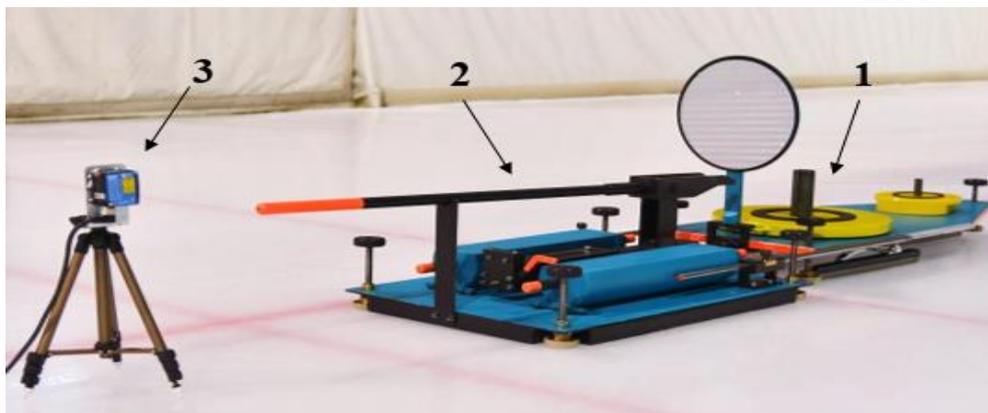


Рис. 1. Внешний вид устройства:

1 – подвижная платформа; 2 – неподвижная платформа; 3 – лазерная система

Fig. 1. – Appearance of the device:

1 – mobile the platform; 2 – fixed platform; 3 – laser system

Для того чтобы подготовить качественное ледовое поле с заданными характеристиками, необходимо знать параметры окружающей среды, при которых значения коэффициента трения скольжения будут минимальными. С этой целью проводились исследования на конькобежном стадионе МКСК «Минск-Арена» при изменяющихся условиях и технологиях подготовки льда, которые заключались в определении значимых факторов внешней среды, способных влиять на состояние ледовой поверхности. Изменяемыми факторами являлись: режимы работы заливочной машины, температура поверхности льда, температура и количество воды при заливке, освещенность ледовой арены. Неизменными факторами являлись: температура воздуха на трибунах (от 12 до 13 °), влажность воздуха (50–55 %), положение вентиляционных диффузоров системы кондиционирования воздуха (45 °).

Всего было проведено 400 измерений дальности пробега подвижной платформы скользяметра (по 15–20 отстрелов на один заливочный цикл при известных условиях окружающей среды и заданных параметрах заливки льда). Во время каждого измерения определялась температура поверхности льда. Измерения длины пробега устройства проводились через каждые 3 минуты в течение 60 минут.

Результаты и их обсуждение

При сопоставлении результатов измерений были рассчитаны средние значения дальности пробега и коэффициента трения скольжения.

Расчет коэффициента трения скольжения проводился по результатам изменения скорости движения платформы на 10-метровом отрезке пути, начиная с 5-го метра движения платформы. Выбор такого расчетного отрезка обоснован исключением влияния начального импульса силы, создаваемого отстрелочным механизмом при выталкивании подвижной платформы. После 15-го метра пути отмечалось значительное увеличение коэффициента трения скольжения, что явилось основанием для исключения из дальнейшего анализа зарегистрированных показателей движения платформы.

В табл. 1 указаны условия, при которых были зафиксированы значения наибольшей и наименьшей дальности пробега платформы устройства ($S_{\text{ср}} \pm \sigma$) за один заливочный цикл (№ усл.), соответственно наименьшие и наибольшие значения коэффициента трения скольжения ($\mu_{\text{ср.тр}} \pm \sigma$). При этом учитывались установленные параметры окружающей среды, как наиболее оптимально влияющие на качество льда: температура бетонной плиты ($t_{\text{пл}}$), температура поверхности льда при выполнении первой попытки ($t_{\text{льда}}$), толщина льда (H), температура воздуха на расстоянии 1,2 м от поверхности льда ($t_{\text{возд.}}$), освещенность (E). Устанавливались параметры подготовки ледовой поверхности: степень открытия вентиля

машины для заливки льда при подаче воды в процессе заливки (кол-во воды), степень срезания верхнего слоя льда (степень срез.), температура заливаемой воды ($t_{\text{воды}}$). Количество измерений (отстрелов) при заданных условиях (n), время после заливки (T).

Таблица 1. Параметры ледовой поверхности
Table 1. Ice surface parameters

№ усл.	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{льда}}, ^\circ\text{C}$	H , мм mm	$t_{\text{возд.}}, ^\circ\text{C}$	Кол-во воды, %	$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	T , мин min	Степень срез. %	E , люкс lx	n	$S_{\text{ср}} \pm \sigma$, мм mm	$\mu_{\text{ср.тр}} \pm \sigma$
Низкие значения дальности пробега устройства и высокие значения коэффициента трения скольжения The worst values of range of a run of a device and coefficient of a sliding friction												
10	-6	-5,3	28	12,8	100	30	20	0	55	15	15473±933	0,0055±0,0003
11	-6	-5,4	29	12,5	100	35	10	100	55	20	17091±527	0,0046±0,0004
Высокие значения дальности пробега скользяметра и низкие значения коэффициента трения скольжения The best values of range of a run of a device and coefficient of a sliding friction												
12	-6	-4,3	29	13,2	50	48	15	100	30	20	22279±2150	0,0033±0,0004
13	-6	-4,5	27	12,0	50	52	10	100	10	20	24195±1110	0,0027±0,0002
14	-6	-3,5	27	12,0	50	55	13	50	20	20	23293±2510	0,0031±0,0004
15	-6	-4,5	27	12,8	100	51	15	50	20	20	23713±1112	0,0030±0,0002

На рис. 2 отображены результаты изменения дальности пробега скользяметра от времени после заливки льда. Во внимание принимались показатели 15–20 измерений на один заливочный цикл.

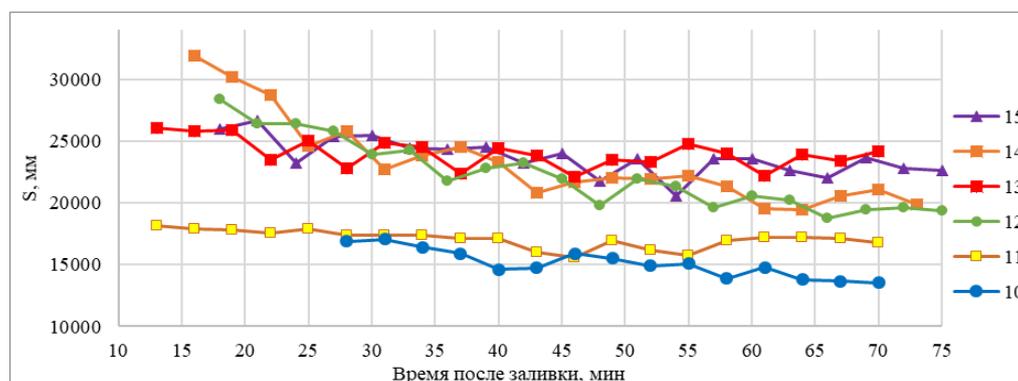


Рис. 2. Зависимость дальности пробега устройства от времени после заливки льда.

Числа 10–15 в легенде графика отражают номер технологической карты с заданными параметрами окружающей среды и параметрами заливки (№ усл. в табл. 1)

Fig. 2. Dependence of the distance covered by the device on the time elapsed after ice preparation 10–15 in the chart legend mean number of the process list with the set of the environment parameters and the ice preparation parameters (№ parameters in table 1)

Полученные данные свидетельствуют о том, что скользящие свойства льда непостоянны, причем в течение одного заливочного периода с увеличением времени после заливки льда они ухудшаются. Динамика показателей дальности пробега скользяметра при различных условиях окружающей среды и параметрах заливки представлена в виде графиков на рис. 2. Из графиков видно, что наибольшие значения дальности пробега наблюдаются в первых 3 попытках (20 минут после заливки льда), в них достигается максимум скользящих свойств. В этот момент времени уменьшается гидравлическое сопротивление жидкой пленки льда и происходит незначительное снижение интенсивности молекулярного взаимодействия между коньком и льдом. Начиная с 23-й минуты скользкость льда постепенно снижается, этому соответствует понижение температуры поверхности льда, изменение твердости верхнего слоя и увеличение коэффициента трения скольжения (рис. 3). Через 35 минут после заливки температура поверхности приближается к температуре основного ледового массива, при этом достаточно стабильно сохраняются скользящие свойства льда (рис. 4). Через 55 минут с момента последней заливки происходит ухудшение условий скольжения, уменьшается дальность пробега устройства: на поверхности льда появляется шероховатость, механические повреждения, микронеровности.

Изменение температуры заливаемой воды и глубины срезания верхнего слоя существенно повлияли на качество ледовой поверхности (№ усл. – 10, 11) (табл. 1). При этих условиях выполняли заливку поверхности льда водой с температурой от +30 до +35 °С, в результате этого на протяжении измерений дальности пробега скользяметра температура льда снижалась до –6,6 °С (рис. 4). При условиях № 10 тонкослойная подрезка верхнего слоя льда с помощью льдуборочной машины не осуществлялась. При этих параметрах заливки были зафиксированы самые худшие результаты дальности пробега, что свидетельствует об увеличении коэффициента трения скольжения (рис. 3).

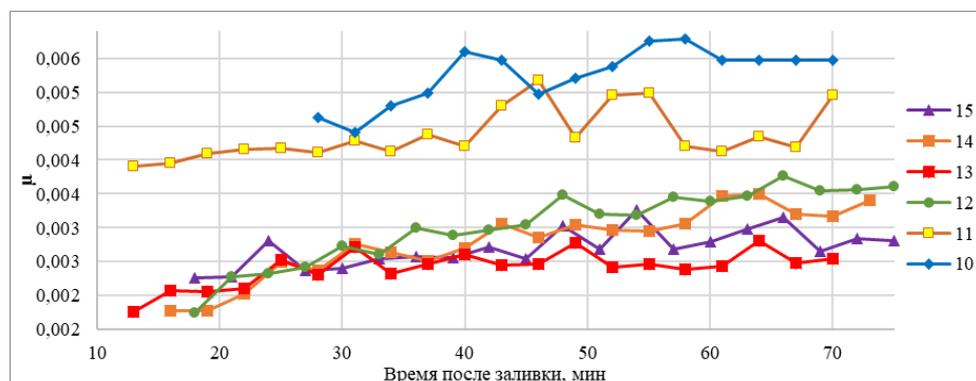


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения скольжения от времени после заливки льда
Fig. 3. Dependence of the sliding friction coefficient on the time elapsed after ice preparation

По мере снижения температуры возрастает коэффициент трения, лед при этом становится более жестким, площадь соприкосновения лезвия конька со льдом уменьшается. Скорость изменения температуры поверхности льда зависит от скорости изменения температуры хладоносителя, от толщины бетонной плиты, от толщины льда и возможностей системы кондиционирования воздуха. Изменение температуры льда от времени после заливки может существенно повлиять на время прохождения дистанции спортсменами. В пределах одного этапа соревнований (особенно на длинных дистанциях) температура поверхности льда всей беговой дорожки или ее части может изменяться от долей до единиц градуса, что, в свою очередь, может привести к значительному изменению скользкости льда.

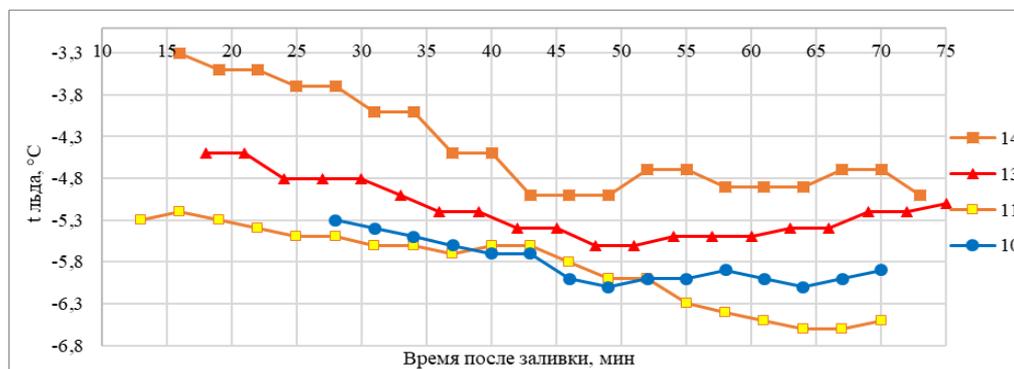


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности льда от времени после заливки
Fig. 4. Dependence of the ice surface temperature on the time elapsed after ice preparation

В результате эксперимента по определению качества льда с применением скользяметра на конькобежном стадионе МКСК «Минск-арена» были выявлены характерные величины коэффициента трения скольжения (μ) спортивного льда при разных условиях. Наименьшие значения этого коэффициента были зафиксированы при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –3,5 до –4,5 °С, температура бетонной плиты – –6 °С, толщина льда – 27–29 мм, температура заливаемой воды – 50–55 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной – 100 %. Наибольшие значения коэффициента трения скольжения получены при следующих параметрах: температура поверхности льда – от –5,3 до –5,4 °С,

температура заливаемой воды – 30–35 °С, срезание верхнего слоя льда ледозаливочной машиной не осуществлялось.

Заключение

На основании результатов исследований определены технически корректные требования к физико-механическим свойствам льда, обеспечивающим наилучшее скольжение конька по льду. Проведенные исследования с использованием разработанного устройства позволили выявить закономерности в изменении скользящих свойств от времени после заливки льда. Через некоторое время после заливки льда ухудшение его скользящих свойств происходит, вероятнее всего, из-за конденсации влаги из воздуха. Влага, выпавшая в виде инея, постепенно создает шероховатость льда. Накопление конденсации влаги напрямую зависит от температуры воздуха, льда и от влажности воздуха. Для подтверждения этого необходимо провести дополнительные исследования, связанные с изменением влажности воздуха на спортивной арене.

Успех проведения международных соревнований на ледовых спортивных аренах и уровень показанных конькобежцами результатов базируются на многих взаимосвязанных компонентах, основным из которых является качество ледовой поверхности. Поэтому применение специальных устройств для оценки скользкости льда позволит приблизиться к разработке технологий «сверхбыстрого льда», способствующих установлению рекордных результатов при проведении международных соревнований самого высокого ранга. Использование этих технологий в тренировочном процессе, в свою очередь, окажет непосредственное влияние на качество технической подготовки спортсменов в видах спорта, в которых движения осуществляются через соприкосновение коньков с ледовой поверхностью.

Список литературы

1. Гончарова Г.Ю., Кузнецов Б.А., Артемов Е.Д. Сверхбыстрый лед: от иллюзии к реальности. *Холодильный бизнес*. 2005;1:24-30.
2. Baurle L., Kaempfer T.U., Szabó D., Spencer N.D. Sliding friction of polyethylene on snow and ice. Contact Area and Modeling. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2007;47(3):276-289. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.10.005.
3. Шавлов А.В., Рябцева А.А., Шавлова В.А. «Сверхскользящий» лед для конькобежного спорта. *Криосфера Земли*. 2007;2:49-59.
4. Kuroiwa D. The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):141-152. DOI: 10.3189/S0022143000029233.
5. Bakker F. редакторы: Gemser H., Koning J. *Handboek wedstrijd schaatsen*. 01. Leeuwarden: Eisma Businessmedia bv; 1998.
6. Kennedy F.E., Schulson E.M., Jones D.E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. *Philos. Mag.* 2000;80(5):1093-1110. DOI: 10.1080/01418610008212103.
7. Кривошеев В.И. Определение коэффициента трения стали по льду конькобежного центра. *Теория и практика физической культуры*. 2012;5:102-104.
8. Tusima K., Kiuchi T. Development of high speed ice skating rink. *J. Jap. Soc. of Snow and Ice*. 1998;60(5):349-356. DOI: 10.5331/seppyo.60.349.
9. Liang H., Martin J.M., Mogne T.L. Experimental investigation of friction on low-temperature ice. *Acta Mater.* 2003;51:2639-2646. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00061-2.
10. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Physics of ice friction. *J. Appl. Phys.* 2010;107(8):2-15. DOI: 10.1063/1.3340792.

References

1. Goncharova G.U., Kuznecov B.E., Artemov E.D. [Superfast ice: from illusion to reality]. *Journal Holodil'nyj biznes= Journal Holodil'nyj biznes*. 2005;1:24-30. (In Russ.)
2. Baurle L., Kaempfer T. U., Szabó D., Spencer N.D. Sliding friction of polyethylene on snow and ice. Contact Area and Modeling. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2007;47(3):276-289. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.10.005.
3. Shavlov A.B., Rjabceva A.A., Shavlova V.A. [Superslippery ice for speed skating]. *Kriosfera Zemli= Kriosfera Zemli*. 2007;2:49-59. (In Russ.)

4. Kuroiwa D. The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):141-152. DOI: 10.3189/S0022143000029233.
5. Bakker F. editors: Gemser H., Koning J. *Handboek wedstrijd schaatsen*. 01. Leeuwarden: Eisma Businessmedia bv; 1998.
6. Kennedy F.E., Schulson E.M., Jones D.E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. *Philos. Mag.* 2000;80(5):1093-1110. DOI: 10.1080/01418610008212103.
7. Krivosheev V.I. [Determination of coefficient of friction became on ice of the skating center] *Teorija i praktika fizicheskoj kul'tury = Teorija i praktika fizicheskoj kul'tury*. 2012;5:102-104. (In Russ.)
8. Tusima K., Kiuchi T. Development of high speed ice skating rink. *J. Jap. Soc. of Snow and Ice*. 1998;60(5):349-356. DOI: 10.5331/seppyo.60.349.
9. Liang H., Martin J.M., Mogne T. L. Experimental investigation of friction on low-temperature ice. *Acta Mater.* 2003;51:2639-2646. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00061-2.
10. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Physics of ice friction. *J. Appl. Phys.* 2010;107(8):2-15. DOI: 10.1063/1.3340792.

Вклад авторов

Давыдов М.В. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации их результатов.

Белоус П.А. разработал методику проведения исследования с применением аппаратно-программного комплекса, разработал протоколы исследования. Производил экспериментальное исследование по всем условиям созданных технологических карт. Осуществил сравнительный анализ полученных данных.

Authors contribution

Davydov M.V. has identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the research results.

Belous P.A. has developed a research methodology using a hardware-software complex, developed research protocols. He carried out an experimental study on all the conditions of the created technological maps. Carried out a comparative analysis of the data.

Сведения об авторах

Давыдов М.В., к.т.н, доцент, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Белоус П.А., аспирант кафедры «Спортивная инженерия» спортивно-технического факультета Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Davydov M.V., Ph.D, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Belous P.A., Post-Graduate Student of Sports Engineering Department of Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, д. 67, к. 206,
Белорусский национальный
технический университет
тел. +375-29-155-32-50;
e-mail: ilpavel94@gmail.com
Белоус Павел Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty av., 67, 206,
Belarusian National Technical University
tel: +375-29-155-32-50;
e-mail: ilpavel94@gmail.com
Belous Pavel Aleksandrovich