

А. М. Бахтиярова¹, М. С. Исмаилова¹, И. Н. Карманов^{1}*

Анализ элементов фигурного катания с использованием законов физики

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: i.n.karmanov@ssga.ru

Аннотация. В зимний период особо актуально катание на коньках, и катки пользуются спросом. На льду катаются и взрослые, и дети. Каждый хочет удивить своих друзей красивым элементом на катке. Мы решили рассмотреть катание на коньках с физической точки зрения, т. к. там действуют законы сохранения энергии, момента импульса, а также законы аэродинамики. Цель работы заключается в рассмотрении элементов катания на коньках с точки зрения физики и практическом применении полученных знаний для улучшения навыков катания. А также в популяризации изучения физики и фигурного катания. В статье рассмотрены элементы фигурного катания с физической точки зрения. Выведены формулы и подобраны оптимальные параметры физических величин для выполнения элементов. Проведен анализ результатов исследования, и полученные знания применены на практике. В результате выполненной работы были выведены формулы и уравнения, описывающие элементы фигурного катания, а также рассчитан центр масс фигуриста в положении «Ласточка», что позволило улучшить навыки катания на коньках.

Ключевые слова: катание на коньках, элементы фигурного катания, закон сохранения момента импульса, момент инерции, вращательное движение, центр масс

A. M. Bakhtiyarova¹, M. S. Ismailova¹, I. N. Karmanov^{1}*

Analysis of figure skating elements using the laws of physics

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: i.n.karmanov@ssga.ru

Abstract. Ice skating is especially popular in winter, and skating rinks are in demand. Both adults and children ride on the ice. Everyone wants to surprise their friends with a beautiful element on the rink. We decided to consider ice skating from a physical point of view, because there are laws of conservation of energy, angular momentum, as well as the laws of aerodynamics.

The purpose of the work is to consider the elements of skating from the point of view of physics and the practical application of the knowledge gained to improve skating skills. And also in popularizing the study of physics and figure skating. This article discusses the elements of figure skating from a physical point of view. Formulas are derived and optimal parameters of physical quantities for performing elements are selected. The analysis of the research results was carried out, and the knowledge gained was applied in practice. As a result of the work performed, formulas and equations describing the elements of figure skating were derived, and the center of mass of the skater in the "Gwallow" position was calculated, which made it possible to improve skating skills.

Keywords: ice skating, elements of figure skating, the law of conservation of angular momentum, moment of inertia, rotational motion, center of mass

Введение

На сегодняшний день катание на коньках и катки пользуются большой популярностью и спросом. Катаясь на коньках, люди редко задумываются, каким образом осуществляется процесс катания на коньках. Мы решили рассмотреть катание на коньках с точки зрения физики, т. к. при катании, на человека действуют законы сохранения энергии, момента импульса, а также законы аэродинамики. Ведь зная, как работают законы физики в катании на коньках, можно применить эти знания на практике и улучшить свои навыки в катании. Цель – вывести физические формулы и подобрать оптимальные значения скорости, момента инерции и угла наклона для лучшей техники выполнения элементов, а также популяризировать фигурное катание и изучение физики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить теоретические сведения, применимые к данной теме;
- на основании изученных сведений, провести расчет параметров, необходимых для улучшения навыков катания;
- применить полученные знания на практике.

В данной статье рассматриваются несложные для выполнения элементы фигурного катания, которым можно научиться благодаря знаниям физики.

Методы и материалы

Ниже представлены элементы фигурного катания, для которых проводилось исследование.

1. Скольжение по дуге. Важной характеристикой скольжения является наклон продольной оси тела к поверхности льда. Силы, действующие на фигуриста, показаны на рис 1.

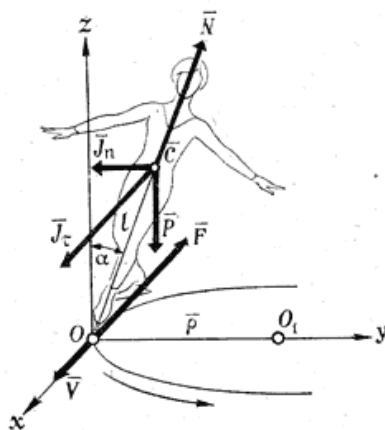


Рис. 1. Силы, действующие на фигуриста

Чтобы получить формулу наклона продольной оси тела к поверхности льда, запишем уравнения динамики в неинерциальной системе отсчета, связанной с

фигуристом, спроецировав силы, действующие на фигуриста во время скольжения по дуге на оси XYZ :

$$OX : I_r - F_{\text{тр}} = 0, \quad OY : N \sin \alpha - I_n = 0, \quad OZ : N \cos \alpha - P = 0, \quad (1)$$

где P – вес фигуриста; I_n, I_r – нормальная и касательная силы инерции; $F_{\text{тр}}$ – сила трения; N – сила реакции; α – угол наклона фигуриста.

С учетом того, что $P = mg$, $I_n = \frac{mV^2}{\rho}$, $F_{\text{тр}} = \mu N$, где ρ – радиус кривизны следа; V – скорость фигуриста; g – ускорение свободного падения; m – масса фигуриста, из (1) можно получить:

$$\frac{V^2}{\rho g} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Для величины силы давления конька опорной ноги на лед получим:

$$N = \frac{mV^2}{\rho \sin \alpha}. \quad (3)$$

Элемент «Ласточка», показанный на рис. 2, можно отнести к частному виду скольжения по дуге.



Рис. 2. Элемент «Ласточка»

Расчет центра масс в позиции «Ласточка»:

$$OX : r_x = \frac{r_1 m_1 + 2r_2 m_2 \cos \beta - r_3 m_3 \cos \alpha}{m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4}, \quad (4)$$

$$OY : r_y = \frac{2r_2 m_2 \sin \beta - r_3 m_3 + r_3 m_3 \sin \alpha + r_4 m_4 \sin \alpha}{2m_2 + 2m_3 + m_4}, \quad (5)$$

$$r_x = 11 \text{ см.}$$

$$r_y = 5,8 \text{ см.}$$

где r_x, r_y – положение центра масс по осям x и y ; m_1, m_2, m_3, m_4 – массы отдельных частей тела (туловища, рук, поднятой ноги, опорной ноги); r_1, r_2, r_3, r_4 – радиус векторы от центра масс человека в положении стоя до центров масс соответствующих частей тела человека.

2. Вращение фигуриста. За быстроту вращения тела отвечает момент инерции I . Посчитать его можно с помощью теоремы Штейнера. Перед началом вращения, момент инерции фигуриста можно представить, как сумму момента инерции стержня и сплошного цилиндра:

$$I = 0,5m_T R^2 + \frac{1}{12}m_2 l^2, \quad (6)$$

где R – радиус при разведении рук (равен 0,2 м); l – размах рук (равен 1,5 м); m_2 – масса рук (равна 14 % массы тела); m_T – масса остального тела (86 %).

За количество вращений фигуриста отвечает момент импульса. Момент импульса связан с энергией, которая нужна на вращении.

Элемент «Вальсовые тройки» можно отнести к вращательному движению, так как фигурист разворачивает тело на 180° с последующим выездом на одну ногу. На рис. 3 показана схема выполнения вальсовых троек.

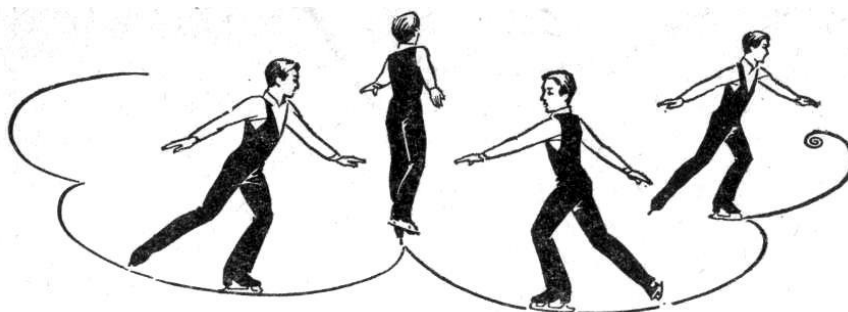


Рис. 3. Схема выполнения вальсовых троек

Можно применить закон сохранения момента импульса для описания движения фигуриста, взяв параметры строения тела среднестатистического человека:

$$L_1 = L_2, L_1 = I_1 \omega_1, L_2 = I_2 \omega_2, I_2 = 0,5mr^2, I_1 = 0,5m_T R^2 + \frac{1}{12}m_2 l^2, \quad (7)$$

где L_1, L_2 – момент импульса перед вращением и момент импульса во вращении; I_1, I_2 – момент инерции между вращениями и момент инерции во вращении; ω_1

ω_2 – угловая скорость перед и во вращении; m – масса тела фигуриста; r – радиус в сгруппированном состоянии.

Используя (7), получим:

$$0,5mr^2\omega_2 = (0,5m_T R^2 + \frac{1}{12}m_2 l^2)\omega_1. \quad (8)$$

С учетом того, что $\left\{ \begin{array}{l} m_T = 0,86m \\ m_2 = 0,14m \\ r = 0,15m \\ R = 0,2m \\ l = 1,5m \end{array} \right\}$, из (8) получим:

$$\omega_2 = 3,86\omega_1. \quad (9)$$

3. Прыжок фигуриста. Кроме угловой есть еще и вертикальная скорость, которая помогает понять, как высоко фигурист прыгнет.

Получим уравнение движения центра тяжести тела, брошенного под углом к горизонту. Учитывая, что проекции начальной скорости прыжка на оси X и Y равны $V_{ox} = V_0 \cdot \cos \alpha_0$, $V_{oy} = V_0 \cdot \sin \alpha_0$, где α_0 – угол вылета; V_0 – начальная скорость вылета. Подставив в уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = V_{ox}t \\ y = V_{oy}t - \frac{gt^2}{2} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x = V_0 \cos \alpha_0 t \\ y = V_0 \sin \alpha_0 t - \frac{gt^2}{2} \end{array} \right\},$$

где t – время полета.

Затем, преобразовав уравнение горизонтального движения и подставив выведенные величины в уравнение вертикального движения, получим:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha_0 - \frac{x^2 g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha_0}. \quad (10)$$

Результаты

В результате проведенного исследования были получены:

- формула наклона продольной оси тела к поверхности льда (2);
- величина давления конька опорной ноги на лед (3);
- закон сохранения момента импульса для фигуриста (9);
- уравнения движения центра тяжести тела, брошенного под углом к горизонту (10);

– центр масс фигуриста в позиции «Ласточка».

К полученным формулам для скольжения по дуге были подобраны экспериментальным путем значения радиуса дуги и определены зависимости радиуса дуги от скорости и давления конька опорной ноги на лед от скорости. А также экспериментальным путем подобран наклон продольной оси тела к поверхности льда. На основе полученных данных были составлены таблицы (табл. 1, табл. 2) и по ним построены графики (рис. 4, рис. 5).

Таблица 1

Зависимость радиуса дуги от скорости

ρ , м	V , м/с	α , °
1	2,1	25
1,5	2,6	25
2	3,02	25
2,5	3,38	25

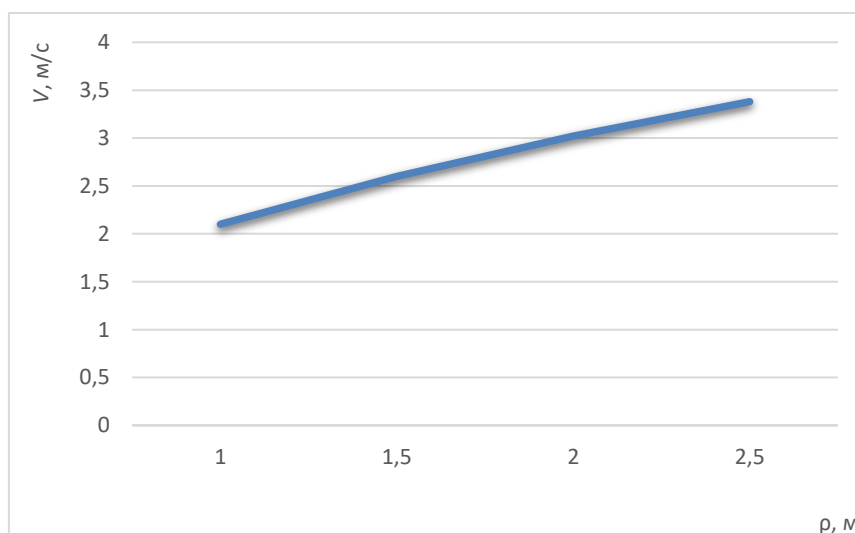


Рис. 4. Зависимость радиуса дуги от скорости

Таблица 2

Зависимость давления конька опорной ноги на лед от скорости

N , Н	α , °	V , м/с	ρ , м
626	25	2,1	1
639	25	2,6	1,5
647	25	3,02	2
648	25	3,38	2,5

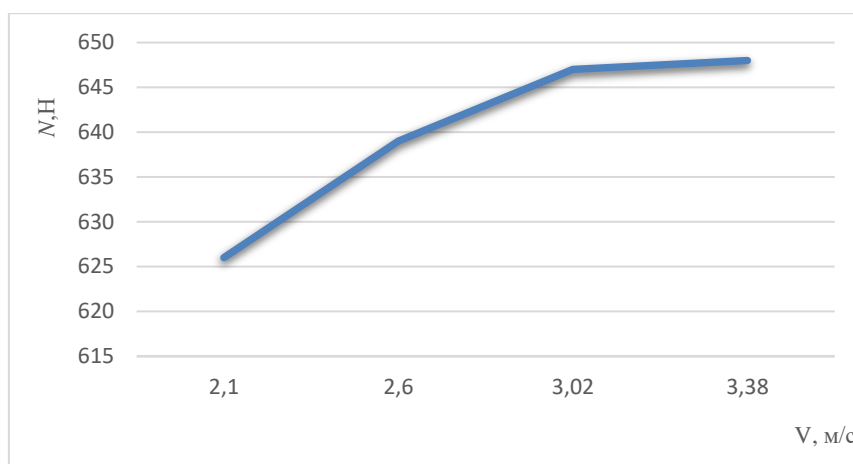


Рис. 5. Зависимость давления конька опорной ноги на лед от скорости

Обсуждение

Анализ результатов исследования показал, что:

- с увеличением радиуса дуги скольжения скорость скольжения увеличивается;
- давление на лед возрастает с увеличением массы тела и скорости его скольжения;
- за быстроту вращения тела отвечает момент инерции I . Момент инерции зависит от массы и расстояния от этой массы до оси вращения. Соответственно, чем больше расстояние (или чем больше масса), тем больше момент инерции, и тем медленнее тело вращается (как только увеличивается момент инерции – уменьшается скорость);
- за количество вращений отвечает момент импульса;
- чем больше скорость и угол вылета, тем выше и пролетнее будет прыжок;
- рассчитав центр тяжести фигуриста в позиции «Ласточка», удалось отметить, что удастся дольше простоять в фигуре при перемещении веса на заднюю часть лезвия конька.

Заключение

В результате проведенного исследования были рассмотрены элементы катания на коньках с точки зрения физики, полученные знания практически применены для улучшения навыков катания на коньках.

Решены следующие задачи:

- изучены теоретические сведения, применимые к данной теме;
- на основании изученных сведений, проведен расчет параметров, необходимых для улучшения навыков катания;
- полученные знания применены на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишин А. Н. Прыжки В фигурном катании – Текст: электронный // Книги. – URL: <https://www.tulup.ru/articles/29/vvedenie.html>. (Дата обращения: 25.02.2024).
2. Мишин А. Н. Биомеханика движений фигуриста – Текст: электронный // Книги. – URL: https://www.tulup.ru/articles/291/shagi_i_spirali.html. (Дата обращения: 25.02.2024).
3. Тюшев А. Н. Курс лекций по физике. Ч. 1. Механика [Текст]: учеб. пособие / А. Н. Тюшев, В. Д. Вылегжанина. 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 144 с.
4. Физика в спорте. – Текст: электронный // Российский учебник. URL: <https://rosuchebnik.ru/material/fizika-v-sporte-7484/>. (Дата обращения: 15.03.2024).

© А.М. Бахтиярова, М.С. Исмаилова, И.Н. Карманов, 2024