

В. С. Гуць, д-р техн. наук

ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці»
вул. Вавілових, 13, м. Київ, 04060, Україна.
orcid.org/00000-0003-3874-5609. E-mail: Goots@ukr.net

О. А. Коваль, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01033, Україна.
orcid.org/0000-0002-9427-1842. E-mail: Koval_andreevna@ukr.net

УМОВИ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІРСЬКОЛИЖНОГО ТРЕНАЖЕРА

Сучасні тренажери-імітатори випускає вітчизняна промисловість. Аналіз руху спортсмена на досліджуваному тренажері-імітаторі показав, що тренажер не здатний в достатній мірі імітувати спуск по схилу гори на сноуборді або лижах при різних швидкостях та режимах фізичного навантаження. Для уникнення травмування спортсменів і відпочиваючих, їх конструкції потребують вдосконалення.

Базою проектування тренажерів, що передають відчуття ковзання по снігу на трасі гірськолижного спуску, є теоретичні розробки, в основу яких покладено диференціальні рівняння другого порядку руху матеріального об'єкта по рухомій похилій поверхні. Математичні моделі, побудовані з їх використанням, дають можливість детально дослідити переміщення матеріального об'єкта по рухомій похилій поверхні.

Розв'язок та аналітичні дослідження виконано із застосуванням методів символічної комп'ютерної математики та побудовою 3D графіків. Отримані графіки дозволяють робити аналіз руху спортсмена на тренажері-імітаторі, що спрощує вибір оптимальних режимів експлуатації тренажерів, наближуючи їх до реальних умов підготовки як спортсменів різного рівня, так і початківців.

Імітація руху на тренажері відбувається завдяки переміщенню стрічки вгору по похилій поверхні та створенні вентилятором зустрічного повітряного потоку. Результати представлених в роботі досліджень мають практичне значення. Вони направлені на удосконалення конструкцій тренажерів та дають можливість швидше засвоїти техніку ковзання початківцям, підвищити майстерність діючим спортсменам. Знайдені величини швидкостей руху та прискорень використані для розрахунків сили удару і його енергетичних параметрів при падінні або зіткненні людини з нерухою перешкодою, завдяки цьому попереджувати можливий травматизм. Для забезпечення безпечних умов спуску, досліджено також ефект поступового збільшення швидкості руху по нахиленій під різними кутами поверхні. Швидкість руху не має перевищувати максимально допустиму як для початківців, так і спортсменів різного рівня підготовки. Враховуючи це, в процесі спуску швидкість треба зменшувати шляхом гальмування. На основі аналізу отриманих математичних моделей руху спортсмена по поверхні тренажера, представлено способи гальмування.

Ключові слова: охорона праці, гірськолижний тренажер, диференціальні рівняння руху, швидкість спуску.

В. С. Гуць, д-р техн. наук

ГУ «Национальный научно-исследовательский институт промышленной безопасности и охраны труда»

ул. Вавиловых, 13, г. Киев, 04060, Украина.

orcid.org/00000-0003-3874-5609. E-mail: Goots@ukr.net

О. А. Коваль, канд. техн. наук

Национальный университет пищевых технологий

ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01033, Украина

orcid.org/0000-0002-9427-1842 E-mail: Koval_andreevna@ukr.net

УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНОЛЫЖНОГО ТРЕНАЖЕРА

Современные тренажеры-имитаторы выпускает отечественная промышленность. Анализ движения спортсмена на исследуемом тренажере-имитаторе показал, что тренажер не способен в достаточной мере имитировать спуск по склону горы на сноуборде или лыжах при различных скоростях и режимах физической нагрузки. Во избежание травмирования спортсменов и отдыхающих, их конструкции нуждаются в совершенствовании.

Базой проектирования тренажеров, что передают ощущение скольжения по снегу на трассе горнолыжного спуска, являются теоретические разработки, в основу которых положены дифференциальные уравнения второго порядка движения материального объекта по движущейся наклонной поверхности. Математические модели, построенные с их использованием, дают возможность детально исследовать перемещения материального объекта по движущейся наклонной поверхности.

Решение и аналитические исследования выполнены с применением методов символьной компьютерной математики и построением 3D графиков. Полученные графики позволяют делать анализ движения спортсмена на тренажере-имитаторе, что упрощает выбор оптимальных режимов эксплуатации тренажеров, приближая их к реальным условиям подготовки как спортсменов разного уровня, так и начинающих.

Имитация движения на тренажере происходит благодаря перемещению ленты вверх по наклонной поверхности и созданию вентилятором встречного воздушного потока. Результаты представленных в работе исследований имеют практическое значение. Они направлены на совершенствование конструкций тренажеров и дают возможность быстрее освоить технику скольжения начинающим, повысить мастерство действующим спортсменам. Найденные величины скоростей движения и ускорений использованы для расчетов силы удара и его энергетических параметров при падении или столкновении человека с неподвижным препятствием, и, благодаря этому, предупреждать возможный травматизм. Для обеспечения безопасных условий спуска, исследован также эффект постепенного увеличения скорости движения по наклонной под разными углами поверхности. Скорость движения не должна превышать максимально допустимую как для начинающих, так и спортсменов разного уровня подготовки. Учитывая это, в ходе спуска скорость нужно снижать путем торможения. На основе анализа полученных математических моделей движения спортсмена по поверхности тренажера, представлены способы торможения.

Ключевые слова: охрана труда, тренажер для горных лыж, дифференциальные уравнения движения, скорость спуска.

Альтернативою активному відпочинку та якісному тренувальному процесу для спортсменів і любителів гірськолижного спорту за відсутності снігу є

сучасні тренажери, за допомогою яких можна продовжувати катання навіть у літню спеку [1]. Сучасні тренажери-імітатори не здатні достатньо повно імітувати спуск по схилу гори на сноуборді або лижах при різних швидкостях та режимах фізичного навантаження, до того ж вони травмонебезпечні.

В Україні використовують різні гірськолижні тренажери, що представлені рядом моделей. Вони відрізняються конструктивними особливостями рухомих елементів, габаритами, енергоспоживанням, кількістю людей, які одночасно можуть тренуватись.

У роботі [2] авторами виконано аналіз сучасних тренажерів-імітаторів гірськолижних спусків, наведено їх комплексні характеристики, сформульовано пропозицію щодо використання травмобезпечного обладнання для різних типів тренувань.

Поширена конструкція тренажера вітчизняного виробництва являє собою платформу, що має похилу поверхню з рухомою стрічкою. Вона виконана з високотехнологічного композитного матеріалу, що імітує снігову трасу. Тренажер створений таким чином, щоб максимально передати відчуття ковзання по снігу. Імітація руху відбувається завдяки переміщенню стрічки вгору по похилій поверхні з різними швидкостями.



Для занять на гірськолижному тренажері використовується звичайне екіпірування: гірські лижі, черевики, палиці, сноуборд [3, 4]. Для забезпечення якісного ковзання, верхній робочий шар стрічки зволожують водою або спеціальним розчином з метою зменшення сили тертя стрічки з поверхнею гірських лиж або сноуборду. За потреби робочий шар стрічки додатково обробляють спеціальною речовиною – концентратом або піною.

Відгуки спортсменів та проведені аналітичні дослідження імітаційних можливостей сучасних тренажерів доводять, що їх технічні характеристики потребують покращення [5, 6]. Для зменшення ризику падіння та отримання травм, які перш за все пов'язані зі швидкостями руху, необхідно мати точні розрахунки безпечних режимів експлуатації тренажерів [7, 8]. Для гірськолижного тренажера зробити це можливо на основі теоретичних досліджень переміщення матеріальних об'єктів по рухомій нахиленій під кутом до горизонту поверхні.

Мета досліджень. Моделювання руху різних матеріальних об'єктів по похилій поверхні, розрахунок безпечних режимів ковзання їх по поверхні

тренажера з врахуванням його конструктивних особливостей, умов, наближених до реального спуску по вкритій снігом гірськолижній трасі.

Задачі досліджень

Виконати моделювання руху матеріального об'єкта по похилій поверхні, отримати математичні залежності, необхідні для розрахунку безпечних режимів руху спортсменів і відпочиваючих по трасі гірськолижного спуску в реальних умовах та умовах експлуатації тренажерів-імітаторів при різних коефіцієнтах тертя, кутах нахилу стрічки, зустрічних повітряних потоках, швидкостях руху, прискореннях.

Провести аналіз руху матеріального об'єкта по похилій поверхні, побудувати 3D графіки для спрощеного визначення зв'язку між конструктивними особливостями тренажерів, кутами нахилу і стану поверхні ковзання та режимами руху по її поверхні.

Дати приклади практичного використання математичних моделей, визначити травмобезпечні швидкості руху, переміщення, прискорення, зусилля. Встановити силу удару як характеристику важкості травмування при падінні людини і зіткненні її з нерухомим об'єктом при різних режимах руху по трасі гірськолижного спуску або експлуатації тренажерів-імітаторів.

Виклад основних результатів дослідження. В основу більшості конструкцій сучасних тренажерів покладено стрічковий, нахилений під кутом до горизонту, транспортер. Стрічка тренажера має копіювати трасу спуску, змінювати кут нахилу і рухатись зі швидкістю, яка забезпечить імітацію реального спуску в природних умовах.

Для розрахунку швидкості спуску гірськолижною трасою, яка має дорівнювати швидкості переміщення стрічки тренажера, запишемо диференціальне рівняння відносного руху матеріальної системи по похилій поверхні (рис. 1).

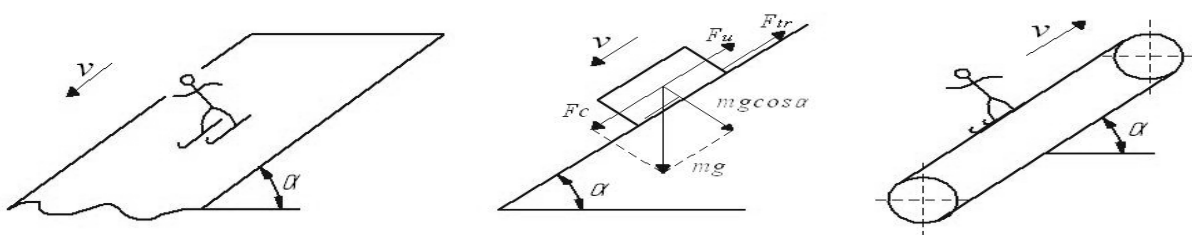


Рис. 1. Схеми руху матеріального об'єкта по похилій поверхні в реальних умовах гірськолижної траси та на тренажері

Сили, що діють на людину вагою m , при куті нахилу траси α

$$F_u + F_{tr} - F_c = 0, \quad (1)$$

де F_u – сила інерції ($F_u = m \frac{d^2 s(t)}{dt^2}$); F_{tr} – сила тертя ($F_{tr} = f_{tr} mg \cos \alpha$);

F_c – сила скочування ($F_c = mg \sin \alpha$).

Підставимо величини діючих сил в рівняння (1) і отримаємо рівняння руху матеріальної системи по похилій поверхні [9]:

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + f_{tr} mg \cos \alpha - mg \sin \alpha = 0, \quad (2)$$

де $s(t)$ – шлях переміщення; t – тривалість руху; m – маса; f_{tr} – коефіцієнт тертя ковзання; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; α – кут нахилу траси спуску або стрічки транспортера.

Виконаємо аналіз отриманої математичної моделі (рівняння (2)) при різних початкових умовах. Розв'язок рівняння при початкових умовах $t = 0 \Rightarrow s(0) = 0; V(0) = 0$

$$s(t) = \frac{1}{2} gt^2 (\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) \quad (3)$$

Виконавши його диференціювання, отримаємо швидкість руху

$$V = \frac{ds(t)}{dt} = gt (\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) показує, що об'єкт в реальних умовах спуску буде рухатись з прискоренням, яке можна знайти з рівняння (2).

Зі збільшенням тривалості перебування його на трасі швидкість буде збільшуватись за лінійним законом. Для забезпечення безпечних умов спуску, при проектуванні та експлуатації тренажера потрібно враховувати ефект збільшення швидкості руху, яка не повинна перевищувати максимально допустиму як для початківців, так і спортсменів різного рівня підготовки. Враховуючи це, її треба зменшувати під час спуску шляхом гальмування. Способи його можуть бути різні. Для їх визначення виконаємо аналіз рівняння руху.

Досягти постійної швидкості руху можливо, якщо прискорення буде дорівнювати нулю ($W=0$). Його знайдемо після диференціювання рівняння (4)

$$W = g(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) \quad (5)$$

Аналіз рівняння свідчить, що на прискорення впливають коефіцієнт тертя ковзання f_{tr} та кут α нахилу траси або стрічки транспортера.

Коефіцієнт тертя можливо змінювати обприскуванням поверхні стрічки різними розчинами, а швидкість руху – зміною кута нахилу доріжки тренажера різними механічними пристроями, зміною напрямку руху, постановкою лиж під кутом до напрямку спуску.

Перепишемо рівняння (5) і отримаємо умови постійної швидкості.

$$0 = g(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) \Rightarrow f_{tr} = \operatorname{tg} \alpha$$

Аналіз експлуатації тренажера свідчить, що коли спортсмен досягне через певний період часу t спуску швидкості V , яку можна розрахувати з рівняння (4), для її зменшення або підтримання на безпечному рівні, необхідно змінювати коефіцієнт тертя, кут нахилу траси або задіяти додаткову силу гальмування.

Безпечно катання потребує дотримання необхідної швидкості руху на різних ділянках траси. Швидкість руху спортсмена на окремих ділянках траси, за наявності відомої початкової швидкості, можна знайти отримавши розв'язок рівняння (2) при початкових умовах $t = 0 \Rightarrow s(0) = 0; V(0) = V_1$

$$s(t) = V_1 t - \frac{t^2}{2} g (f_{tr} \cos \alpha - \sin \alpha) . \quad (6)$$

Після диференціювання рівняння (6) знайдемо швидкість руху

$$V(t) = \frac{ds(t)}{dt} = V_1 - gt (f_{tr} \cos \alpha - \sin \alpha) . \quad (7)$$

Коли виникає необхідність визначити переміщення та швидкість руху на окремих проміжних етапах спуску після проходження ділянки траси довжиною s_1 , запишемо інші початкові умови, необхідні для розв'язання рівняння (2).

При початкових умовах $t = 0 \Rightarrow s(0) = s_1; V(0) = V_1$ маємо переміщення $s(t)$ та швидкість $V(t)$ на відрізку $s_1-s(t)$. Переміщення $s(t)$ буде:

$$s(t) = V_1 t + s_1 - \frac{1}{2} g t^2 (f_{tr} \cos \alpha - \sin \alpha) . \quad (8)$$

Розрахункові параметри $s(t)$ та $V(t)$ потрібно знати, коли фіксується результат на проміжних ділянках траси.

Розглянемо приклади практичного застосування представлених математичних моделей.

Використаємо рівняння (4). Для умов $g=9,8 \text{ м/с}^2$, коефіцієнтів тертя в інтервалі від $f_{1tr} = 0,2$ до $f_{2tr} = 0,28$, маємо графік 3D залежності швидкості руху від кута нахилу α та тривалості руху t (рис. 2).

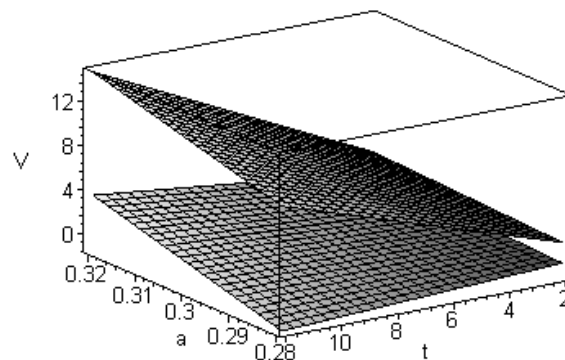


Рис. 2. Залежність швидкості руху на трасі спуску або стрічці тренажера для режимів, коли початкова швидкість $V_1=0$, кути нахилу $0,28 \leq \alpha \leq 0,33$ радіан ($16,1 \leq \alpha \leq 18,5$ град), інтервал руху $2 \leq t \leq 12$ с при відомих сталих коефіцієнтах тертя $f_{1tr}=0,2$ та $f_{2tr}=0,28$.

Коли розглядаємо рух при початковій швидкості $V_1=1,5 \text{ м/с}$ і тих самих умовах руху, маємо 3D графік (рис. 3).

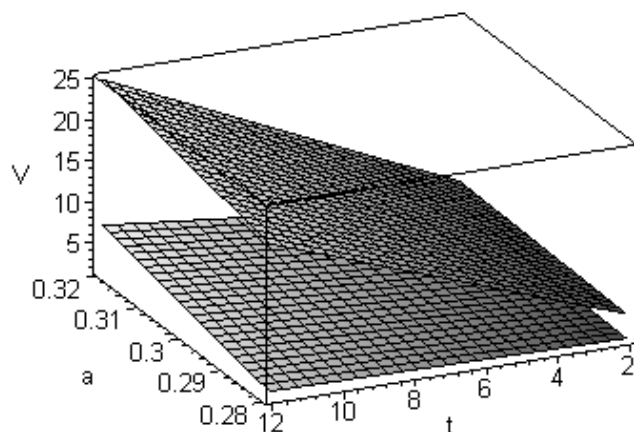


Рис. 3. Залежність швидкості руху на трасі спуску або стрічці тренажера для режимів, коли початкова швидкість $V_1=1,5\text{ м/с}$, кути нахилу доріжки $0,28 \leq \alpha \leq 0,33$ радіан ($16,1 \leq \alpha \leq 18,5$ град), інтервал руху $2 \leq t \leq 12\text{ с}$ при відомих сталих коефіцієнтах тертя $f_{1tr} = 0,2$ та $f_{2tr} = 0,28$

Отримані математичні моделі та аналіз графіків дають можливість вибирати режими експлуатації тренажерів, наближені до реальних умов спуску лижника по трасі. При спуску по снігу треба в отримані математичні моделі підставляти менші величини коефіцієнтів тертя, які залежать від погодних умов та стану траси.

Так, для коефіцієнтів тертя $f_{1tr}=0,05$ та $f_{2tr}=0,12$ при початкових швидкостях $V_1=0\text{ м/с}$ та $V_1=0,5\text{ м/с}$, маємо графіки рис. 4 та рис. 5.

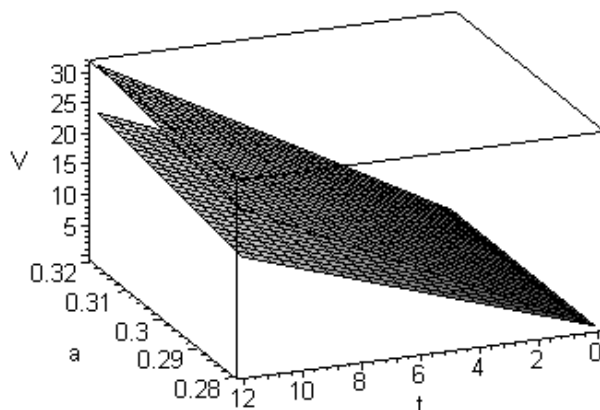


Рис. 4. Залежність швидкості руху стрічки тренажера $V = \varphi(\alpha, t)$ при початковій швидкості $V_1 = 0\text{ м/с}$ і коефіцієнтах тертя $f_{1tr} = 0,05$ та $f_{2tr} = 0,12$

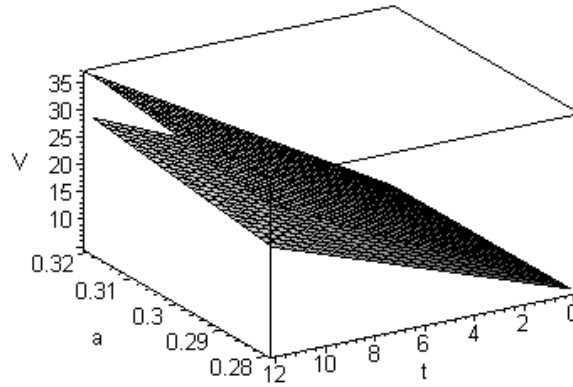


Рис. 5. Залежність швидкості руху стрічки тренажера $V = \varphi(\alpha, t)$ при початковій швидкості $V_1 = 1,5$ м/с і коефіцієнтах тертя $f_{1tr} = 0,05$ та $f_{2tr} = 0,12$

Виконаємо аналіз математичних моделей при наявності опору повітря. Для регулювання і підтримання постійної або необхідної швидкості руху доцільно використовувати додаткове зусилля опору. Зусилля опору запишемо:

$$F_g = k \frac{dS(t)}{dt}, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт опору повітря.

Тоді рівняння рівноваги сил матиме вигляд:

$$F_n + F_{tr} - F_c + F_g = 0, \quad (10)$$

Після підстановки величин діючих сил маємо рівняння руху:

$$m \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + f_w mg \cos \alpha - mg \sin \alpha + k \frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (11)$$

Розв'язок рівняння (11) при початкових умовах $t = 0 \Rightarrow x(0) = 0; V(0) = 0$

$$S(t) = \frac{mg}{k^2} \left\{ (\sin \alpha - f_w \cos \alpha) \left[kt - m \left(1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

Після диференціювання рівняння (12) знайдемо швидкість руху

$$V(t) = \frac{mg}{k} (\sin \alpha - f_w \cos \alpha) \left(1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right) \quad (13)$$

Умовою руху спортсмена з постійною швидкістю – є те, що прискорення має дорівнювати нулю або наближатися до нього

$$W(t) = 0 \Rightarrow W(t) = ge^{-\frac{kt}{m}} (\sin \alpha - f_w \cos \alpha) \Rightarrow \sin \alpha = f_w \cos \alpha \Rightarrow f_w = \tan \alpha \Rightarrow ge^{-\frac{kt}{m}} \rightarrow 0 \quad (14)$$

На рис. 6 приведено 3D графік залежності $V(t, \alpha)$ для умов, коли $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; коефіцієнти тертя $f_{tr} = 0,28$ та $0,12$; $k = 0,1 \text{ кг/с}$; $m = 80 \text{ кг}$.

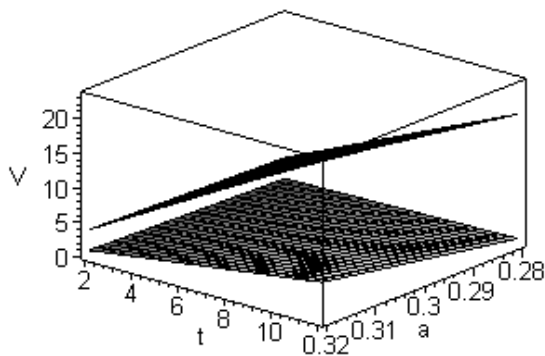


Рис. 6. Залежність швидкості V від тривалості руху t та кута α нахилу при дії додаткового опору

На рис. 7 наведено 3D графік залежності прискорення $W(t, \alpha)$ для вищенаведених умов спуску.

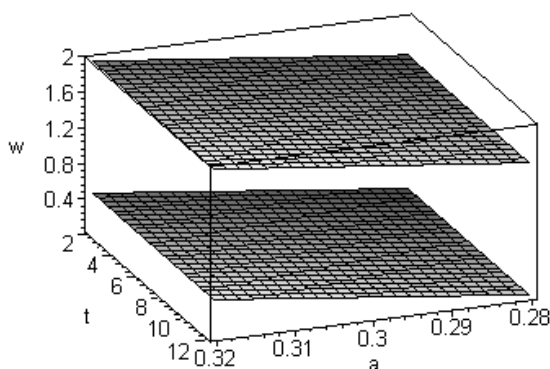


Рис. 7. Залежність прискорення W від тривалості руху t та кута нахилу α стрічки тренажера

Гальмування руху відбувається, коли $f_{tr} \cos \alpha > \sin \alpha \Rightarrow f_{tr} > \tan \alpha$ або $ge^{\frac{kt}{m}} \rightarrow 0$

У процесі тренування спортсменів виникає необхідність визначати швидкість на окремих ділянках траси спуску. В разі, коли досліджується рух на будь-якому відрізку траси, починаючи від нуля при початковій швидкості руху V_1 ($t = 0 \Rightarrow x(0) = 0; V(0) = V_1$), розв'язок рівняння (11) буде:

$$S(t) = \frac{mV_1}{k} + \frac{m}{k^2} e^{-\frac{kt}{m}} [(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha)mg] - V_1 k + \frac{mg}{k^2} (kt - m)(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) . \quad (15)$$

Виконавши диференціювання рівняння (7) отримаємо швидкість

$$V = \frac{1}{k} \left\{ [mg(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha)] - e^{-\frac{kt}{m}} [(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha)mg - V_1 k] \right\} . \quad (16)$$

Знайдемо прискорення

$$W = \frac{1}{m} e^{-\frac{kt}{m}} [mg(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) - V_1 k]. \quad (17)$$

Умовою постійної швидкості руху буде $W=0$

$$mg(\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) = V_1 k \Rightarrow \sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha = \frac{V_1 k}{mg} \Rightarrow k = \frac{mg}{V_1} (\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha)$$

$$\text{або } \frac{1}{m} e^{-\frac{kt}{m}} \rightarrow 0. \quad (18)$$

З технічної точки зору, для наближення умов тренування до реальних на тренажері необхідно встановити регулятор інтенсивності повітряного потоку, наприклад, вентилятор. Тоді зустрічний повітряний потік буде гальмувати рух спортсмена та регулювати його швидкість.

Ефект реального спуску допоможе досягти періодична зміна кута нахилу доріжки тренажера. Це дасть можливість моделювати коливання траси спуску, яке має місце в реальних умовах за наявності пагорбів. У цьому випадку диференціальне рівняння руху запишемо

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + f_{tr} mg \cos(\omega t) - mg \sin(\omega t) = 0, \quad (19)$$

де ω – частота, з якою змінюється кут нахилу доріжки тренажера.

Розв'язок рівняння (19) при початкових умовах $t=0 \Rightarrow s(0)=0; v(0)=0$ буде:

$$s(t) = \frac{g}{\omega^2} [f_{tr} \cos(\omega t) - \sin(\omega t) + \omega t - f_{tr}]. \quad (20)$$

Після диференціювання рівняння (20), знайдемо швидкість руху стрічки тренажера.

$$v(t) = \frac{g}{\omega} [1 - f_{tr} \sin(\omega t) - \cos(\omega t)]. \quad (21)$$

Для проектування тренажера важливо знати прискорення на окремих ділянках доріжки

$$w = g(\sin(\omega t) - f_{tr} \cos(\omega t)). \quad (22)$$

Якщо врахувати опір повітря від вентилятора, то рівняння (19) можна записати

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + f_{tr} mg \cos(\omega t) + \kappa \frac{ds(t)}{dt} - mg \sin(\omega t) = 0. \quad (23)$$

Розв'язок його за тих же початкових умов буде:

$$s(t) = \frac{1}{k^2 + \omega^2 m^2} \left[m^2 g f_{tr} \cos(\omega t) - m^2 g \sin(\omega t) - \frac{1}{\omega} g k m \cos(\omega t) - \frac{m^2 g (f_{tr} k + \omega m) k}{k^2 + \omega^2 m^2} e^{-\frac{kt}{m}} - \frac{m^4 g (f_{tr} k + \omega m) \omega^2}{(k^2 - \omega^2 m^2) k} e^{-\frac{kt}{m}} - \frac{m g f_{tr} k \sin(\omega t)}{\omega} \right] + \frac{m g}{k \omega}. \quad (24)$$

Після диференціювання рівняння (24), знайдемо швидкість руху стрічки тренажера

$$v(t) = \frac{1}{k^2 + \omega^2 m^2} \left[\frac{mg(f_r k + \omega m)}{k^2 + \omega^2 m^2} e^{-\frac{kt}{m}} (k^2 + m^2 \omega^2) - mg(f_r k \cos(\omega t) + m f_r \omega \sin(\omega t) + m \omega \cos(\omega t) - k \sin(\omega t)) \right]. \quad (25)$$

Виконавши диференціювання рівняння (25), знайдемо прискорення

$$W(t) = \frac{1}{k^2 + \omega^2 m^2} \left[mg(f_r k \omega \sin(\omega t) - m f_r \omega^2 \cos(\omega t) + m \omega^2 \sin(\omega t) + \omega k \cos(\omega t) - \frac{gk(f_r k + \omega m)}{k^2 + \omega^2 m^2} + e^{-\frac{kt}{m}} (k^2 + m^2 \omega^2)) \right]. \quad (26)$$

Рівняння (24), (25), (26) складні для аналітичних досліджень без використання сучасної комп'ютерної техніки, тому спростимо їх прийнявши $k \frac{ds(t)}{dt} \approx k V_{cp}$, де V_{cp} – середня відносна швидкість.

Тоді диференціальне рівняння руху буде:

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + f_r mg \cos(\omega t) + k V_{cp} - mg \sin(\omega t) = 0. \quad (27)$$

Розв'язок його запишемо

$$s(t) = \frac{1}{m} \left\{ \frac{mg}{\omega^2} [(f_r \cos(\omega t)) - \sin(\omega t)] - \frac{1}{2} V_{cp} k t^2 \right\} + \frac{gt}{\omega} - \frac{f_r g}{\omega^2}. \quad (28)$$

Виконавши диференціювання рівняння (28) знайдемо швидкість $V(t)$ руху стрічки тренажера

$$V(t) = \frac{g}{\omega} - \frac{1}{m} \left\{ \frac{mg}{\omega} [f_r \sin(\omega t) + \cos(\omega t)] + V_{cp} k t \right\}. \quad (29)$$

Після диференціювання рівняння (29) знайдемо прискорення

$$W(t) = \frac{1}{m} [mg \sin(\omega t) - f_r mg \cos(\omega t) - V_{cp} k]. \quad (30)$$

Режими руху, які описуються рівнянням (19) при $f_{tr} = 0,3$, представлено у вигляді 3D графіків.

Залежність переміщення $s(t, \omega)$ від тривалості t і частоти ω зміни кута нахилу стрічки тренажера показано на рис. 8, швидкості руху $V(t, \omega)$ – на рис. 9, прискорення $W(t, \omega)$ – на рис. 10.

Режими руху, які описуються рівнянням (23) при $f_{tr}=0,1$; $m=100$ кг; $k=0,1$, представлено у вигляді графіків 3D (рис. 11–13).

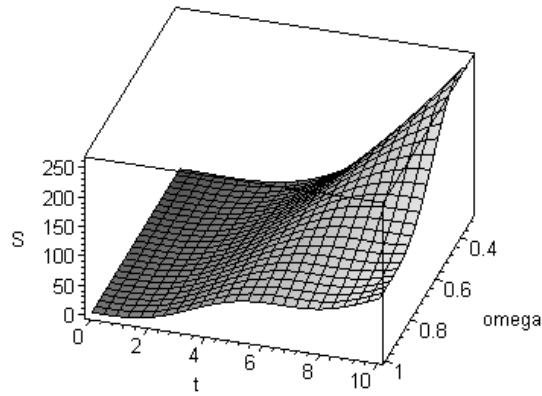


Рис. 8. Залежність переміщення $S(t,\omega)$ від тривалості t руху та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

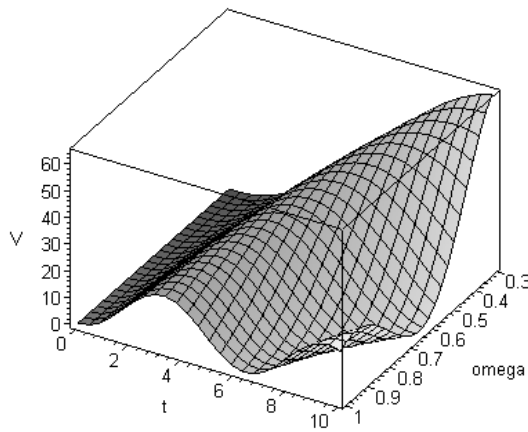


Рис. 9. Залежність швидкості руху $V(t,\omega)$ від тривалості руху t та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

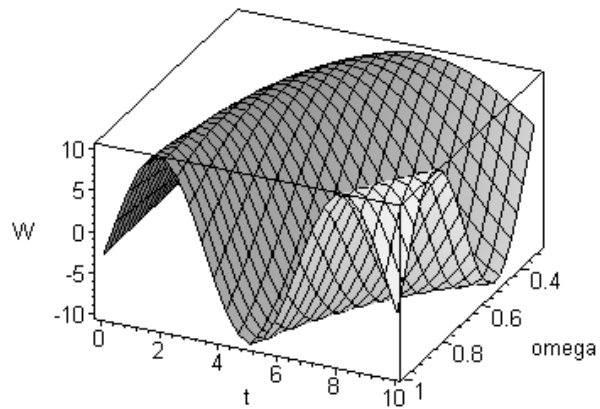


Рис. 10. Залежність прискорення $w(t,\omega)$ від тривалості руху t та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

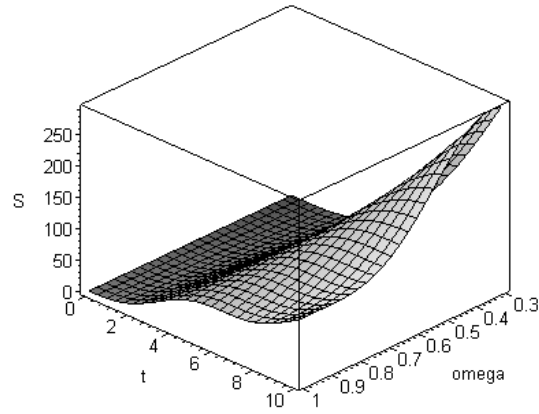


Рис. 11. Залежність переміщення $S(t, \omega)$ від тривалості руху t та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

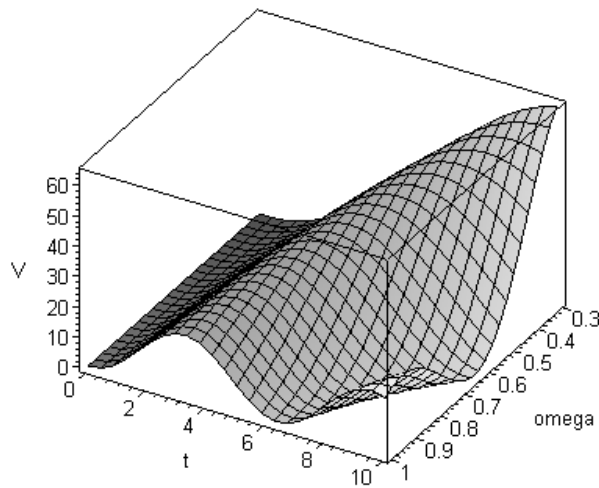


Рис. 12. Залежність швидкості руху $V(t, \omega)$ від тривалості руху t та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

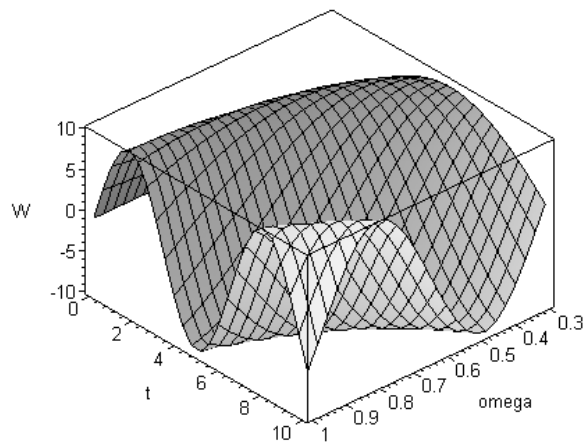


Рис. 13. Залежність прискорення $w(t, \omega)$ від тривалості руху t та частоти ω зміни кута нахилу доріжки тренажера

Порівняльний аналіз графіків побудованих за рівняннями (19) та (27), показує можливості корегування режимів руху шляхом зміни коефіцієнтів тертя та опору повітря, частоти зміни кута нахилу доріжки тренажера. Способи впливу на режими руху пов'язані між собою. Так, наприклад, при зменшенні коефіцієнта тертя з 0,3 до 0,1 та одночасним збільшенням коефіцієнта опору повітря до 0,1, маємо один і той же результат – графіки мають практично однаковий вигляд. Це спрощує проектування та експлуатацію тренажера, використання його для відпочиваючих і тренування спортсменів різного рівня кваліфікації.

Знайдені величини прискорень $W(t)$ дають можливість розрахувати силу удару і його енергетичні параметри при падінні або зіткненні людини з нерухомою перешкодою та завдяки цьому мінімізувати можливість отримати травму.

За математичною моделлю, яка описує рух гірськолижною трасою, сила удару при падінні або зіткненні людини з нерухомою перешкодою буде:

$$P_2(t) = mge^{\frac{kt}{m}} (\sin \alpha - f_{tr} \cos \alpha) . \quad (31)$$

Порівнявши визначену з рівняння (31) силу удару з силою удару, яка має місце при падінні людини з висоти, визначити важкість травми, отриманої на тренажері, просто. Для цього потрібно використати численні довідкові дані рівня травматизму при гравітаційному падінні – силу удару і важкість травми, та порівняти їх із силою удару при падінні на спуску або знаходженні на тренажері.

Висновок.

Виконано моделювання руху матеріального об'єкта по похилій поверхні. Отримані математичні моделі дають можливість розрахувати безпечні режими руху спортсменів і відпочиваючих по трасі спуску в реальних умовах та умовах експлуатації тренажерів-імітаторів при різних коефіцієнтах тертя, кутах нахилу стрічки, зустрічних повітряних потоках, швидкостях руху, прискореннях.

Використання 3D графіків дозволяє провести візуальний аналіз руху матеріального об'єкта по похилій поверхні, спростити вибір оптимальних і безпечних режимів експлуатації тренажерів, наближених до реальних умов підготовки спортсменів різного рівня та початківців.

Ефекту реального спуску допоможе досягти періодична зміна кута нахилу доріжки тренажера як по всій довжині, так і на окремих її ділянках. Це дасть можливість моделювати профіль траси спуску при наявності пагорбів.

Знайдені величини прискорень $W(t)$, необхідні для розрахунку сили удару і його енергетичних параметрів при падінні або зіткненні людини з нерухомою перешкодою, та завдяки цьому мінімізувати можливість отримати травму.

Список літератури

1. Чорненька Н. В. Організація туристичної індустрії : навч. посіб. Київ : Атіка. 2006. 264 с.
2. Коваль О. А., Гуць В. С. Тренажери-імітатори для гірськолижного відпочинку. *Молодий вчений*. 2017. № 5. С. 475–479.
3. Водлозеров В. Є. Ефективність використання інноваційних тренажерів локально направленої дії в масовій фізичній культурі : автореф. дис. ... канд. наук з фіз. виховання і спорту : 24.00.02. Харків, 2008. 21 с.
4. Лейкин М. Г. Научное обоснование и создание спортивно-оздоровительных тренажеров : дис. доктора пед. наук в виде научного доклада. Москва, 1993. 119 с.
5. Ратов И. П. О возможности совершенствования приемов управляемого воздействия спортсменов с внешними силами на основе использования тренажерных устройств. *Научные труды ВНИИФК за 1971 год*. Москва, 1973. Т. 2. С. 134–136.
6. Ратов И. П. Концепция перспективного развития физкультурно-спортивных тренажеров. *Теория и практика физической культуры*, 1990. № 8. С. 10–13.
7. Уткин В. Л. Биомеханика физических упражнений : учебн. пособие для фак. физ. воспитания пед. ин-тов и для ин-тов физ. культуры : по спец. № 2114 «Физ. воспитание». Москва : Просвещение, 1989. 205 с.
8. Филипецкая Е. Н. Исследование механики спортивных и оздоровительных тренажеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.18. Санкт-Петербург, 2000. 18 с.
9. Бут С. А. Розвиток обладнання поточкових систем харчових виробництв на основі використання гравітаційних сил : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Київ, 2005. 18 с.

V. Huts, Doctor of Technical Sciences

РА «National Scientific and Research Institute of Industrial Safety and Occupational Safety and Health»

vul. Vavilovykh, 13, Kyiv, 04060, Ukraine.

orcid.org/00000-0003-3874-5609. E-mail: Goots@ukr.net

O. Koval, PhD

National University of Food Technologies

Volodymyrska str.68, Kyiv, 01033, Ukraine.

orcid.org/0000-0002-9427-1842. E-mail: Koval_andreevna@ukr.net

SAFE OPERATION CONDITIONS OF SKIING SIMULATOR

Purpose. To improve design of skiing simulators in order to prevent injuries. Modern simulators are produced by domestic industry. Analysis of the movement of

an athlete on the simulator showed that the simulator is not able to adequately simulate descent from the mountain on snowboard or skis at different speeds and modes of physical activity. To avoid injuries to athletes and holidaymakers, their designs need to be improved. **Methodology.** The basis for designing simulators that convey the feeling of sliding through the snow on the ski slope is theoretical development based on differential equations of the second order of motion of a material object along a moving inclined surface. Mathematical models constructed with their use make it possible to study in detail the movements of material object along a moving inclined surface. The solution and analytical studies are performed using the methods of symbolic computer mathematics and the construction of 3D graphs. The resulting graphs allow to perform the analysis of the athlete movement on the simulator, which simplifies the selection of optimal operating modes for simulators, bringing them closer to the real conditions of training for both athletes of different levels and beginners. Simulation of motion on the simulator is due to the movement of a band upward along the inclined surface and the creation of air counterflow by the fan. **Results.** The results of the research presented in this work are of practical importance. They are aimed at improving the construction of simulators provide an opportunity to quickly master the technique of sliding beginners and to improve the skills of athletes. The values of the motion velocities and accelerations found are used to calculate the impact force and its energy parameters when a person falls or collides with a fixed obstacle, and, therefore, prevents possible traumatism. To ensure safe sliding conditions, the effect of a gradual increase in speed of movement along an inclined surface at different angles is also investigated. The speed of movement should not exceed the maximum permissible for both beginners and athletes. Given this, during descent, the speed should be reduced by braking. Based on the analysis of the mathematical models of the athlete's movement along the surface of the simulator, the methods of inhibition are presented.

Key words: labor protection, ski simulator, mountain ski equipment, differential equalizations of motion, speed lowering.

REFERENCES

1. Chornenka, N. V. (2006). *Orhanizatsiia turystychnoi industrii: navch. Posib.* [Organization of the tourism industry: training. manual]. Kyiv : Atica, 264 p. [in Ukrainian].
2. Koval, O. A. & Huts, V. S. (2017). *Trenazhery-imitatory dlia hirskolyzhnoho vidpochynku.* [Ski-simulators for the mountain ski vacation. *Young Scientist.* 5 (45). 475–479 [in Ukrainian].
3. Vodlozerov, V. Ye. (2008). *Efficiency of the use of innovative training devices of locally directed action in the mass physical culture.* Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Leikin, M. G. (1993). *Scientific substantiation and the creation of sports and fitness simulators.* Doctor's thesis. In the form of a scientific report. Moscow [in Russian].

5. Ratov, I. P. (1973). O vozmozhnosti sovershenstvovanija priemov upravljaemogo vozdejstvija sportsmenov s vneshnimi silami na osnove ispolzovanija trenazhnyh ustrojstv. [About the possibility of improving the methods of manipulating the impact of athletes with external forces based on the use the simulators]. Nauchnye trudy VNIIFK za 1971 god. [Scientific Works of VNIIFK for 1971]. Moscow, 2. 134–136 [in Russian].

6. Ratov, I. P. (1990). Konceptija perspektivnogo razvitija fizkulturno-sportivnyh trenazherov. [The concept of long-term development of physical training sports simulators]. Teorija i praktika fizicheskoj kultury. [Theory and Practice of Physical Culture]. Moscow. 8. 10–13 [in Russian].

7. Utkin, V. L. (1989). Biomehanika fizicheskikh uprazhnenij [Biomechanics of Physical Exercises]. Ucheb. posobie [Textbook]. Prosveshchenie [Enlightenment]. Moscow. 205 [in Russian].

8. Filipeckaja, E. N. (2000). *Issledovanie mehaniki sportivnyh i ozdorovitelnyh trenazherov*. Extended abstract of candidate's thesis. St. Petersburg [in Russian].

9. But, S. A. (2005). *Development of the equipment of flow systems of food production on the basis of the use of gravity forces*. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv [in Ukrainian].

Дата подання статті до збірника – 05.06.2018