Д. С. Ябуров

Научный руководитель: Евгения Александровна Ябурова,учитель физики, к.п.н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЫЖ ОТ РОДА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лыжные гонки являются специфическим видом спорта, в котором наряду с физической, технической, тактической и психологической подготовкой важное место занимает процесс подготовки лыж.

Ряд исследователей (К.А. Багин, П.М. Виролайнен и др.) считают, что существует прямая зависимость спортивных результатов от подготовки скользящей поверхности гоночных лыж [5, 6]. В условиях острой конкуренции технологии подготовки лыж совершенствуются и становятся все более профессиональными.

Актуальность исследования зависимости коэффициента трения скольжения гоночных лыж от рода смазочных материалов не вызывает сомнения по ряду причин. Во-первых, она обусловлена разрешением противоречия между необходимостью повышения качества подготовки лыж и отсутствием единого мнения среди специалистов в вопросах использования тех или иных смазочных материалов. Кроме того, недостаточное финансирование лыжного спорта в г. Соликамске оказывает влияние на качество приобретаемых лыж и смазок (главным условием выбора спортивного инвентаря зачастую становится его невысокая цена). Именно по этой причине спортсмену-лыжнику очень важно знать, какая из имеющихся смазок будет более эффективной при тех или иных погодных условиях для достижения высокого результата в гонках при одних и тех же физических параметрах спортсменов.

Определяющим моментом при взаимодействии скользящей поверхности лыж со снегом является трение. Сила трения всегда действует вдоль поверхности тел при их непосредственном соприкосновении и препятствует относительному движению соприкасающихся тел. Сила трения зависит от состояния трущихся твердых поверхностей.

Экспериментально доказано, что сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления тела на опору (или силе реакции опоры):

$F_{тр} = \mu N$, где μ – коэффициент трения, зависящий от рода трущихся поверхностей и качества их обработки.

Трение поверхности лыж о снег является результатом сложных молекулярных и механических взаимодействий двух поверхностей. Различают силы трения скольжения, которые возникают при скольжении лыжи по снегу, и силы трения сцепления, обеспечивающие остановку лыжи. Различия в силе трения скольжения обуславливаются образованием водяной пленки разной толщины [1].

Силу трения скольжения можно уменьшить во много раз с помощью смазки - чаще всего тонкого слоя жидкости - между трущимися поверхностями. Трение между слоями жидкости, прилегающими к твердым поверхностям, значительно меньше, чем между сухими поверхностями.

Нанесение смазки на поверхность лыжи позволяет уменьшить силу молекулярного притяжения (силу сцепления) и одновременно увеличить водонепроницаемость пластика. Когда лыжа движется по снегу, снежные кристаллы плавятся в точке контакта со скользящей поверхностью, и лыжа скользит на тонкой пленке воды в каждой точке контакта. Идеальная температура для скольжения -4°С. Когда температура понижается, начинает преобладать сухое скольжение. Когда температура становится выше -4°С, начинает образовываться слишком много воды под лыжей, усиливается капиллярное притяжение между лыжей и водой на поверхности снега [5].

Прогресс в технологиях привел к созданию лыжных смазок практически для всех погодных условий. Однако большое разнообразие смазок делает выбор правильной смазки лыж трудной задачей даже для опытных смазчиков и гонщиков.

Важнейшими свойствами лыжной смазки являются: *твердость* (смазка всегда должна быть тверже снега, чтобы его частицы не проникали в лыжу и не тормозили ее); *коэффициент трения* (он должен быть низким, насколько это возможно); *водоотталкиваемость* (она должна быть достаточно высока, чтобы преодолеть водяное молекулярное притяжение); *антистатические свойства* (накопление статического электричества должно быть минимизировано, насколько это возможно); *грязепоглощение* (смазка не должна поглощать грязь, пыль или маслянистые атмосферные фракции).

Современные лыжные смазки могут обеспечивать все сразу или некоторые из необходимых свойств. Эти смазки могут быть разделены на следующие категории: углеводороды, фтороводороды, фторированные смазки, графиты, фторграфиты [6, 7]. При имеющемся изобилии смазок, доступных сегодня, становится возможным уменьшение влияния всех составляющих трения и достижение оптимального скольжения при любых условиях. Все, что для этого необходимо - это информация о погоде (влажность, температура снега и др.) и диаграммы по смешиванию смазки.

А как же поступить в том случае, когда из-за большой цены на смазочные материалы приходится довольствоваться только теми смазками, которые есть в наличии на лыжной базе?

На выбор смазочных материалов существенное влияние оказывает ряд факторов, среди которых решающее значение имеет *температура окружающего воздуха*.

Температуры, указанные на упаковках парафинов, порошков, мазей и эмульсий - это температуры воздуха. Для правильного выбора смазки необходимо произвести замер температуры воздуха в тени. Это необходимо сделать (если есть такая возможность) в нескольких точках вдоль трассы. Это связано с тем, что между низшей и высшей точками трассы наблюдается большая разница в температуре, состоянии снега. Бывают примеры, когда внизу трассы идет дождь, сырой снег, а наверху - сухая снежная крупа. Тогда приходится решать, то ли наносить на лыжу смазку на держание, то ли жертвовать держанием и идти на «отдающих» лыжах. Полезно знать также температуру поверхности снега. Необходимо помнить, что, достигнув точки замерзания (0°С), температура снега дальше расти не будет, как бы ни поднималась далее температура воздуха. В этом случае лучше использовать температуру воздуха и обратить большее внимание на определение содержания воды в снеге.

Приведем пример. Если ночью стоял мороз -20°С, а к десяти часам утра температура повысилась до -10°С, значит температура снега находится в пределах -15°С. То есть, если ночью было холоднее, чем утром, это почти всегда означает, что снег холоднее воздуха как минимум на несколько градусов. Разницу температур снега и окружающего воздуха должен помочь уловить термометр для снега.

Еще одним фактором, влияющим на выбор смазочных материалов, является *влажность воздуха*. Влажность важна скорее как локальная тенденция климата, а не как необходимость каждый раз точно измерять ее процентную величину. Важно знать, проходят ли соревнования в зоне сухого климата со средней влажностью до 50%, нормального климата влажностью 50-80% или влажного климата 80-100%. Влажность воздуха измеряется гигрометром. Если нет гигрометра, можно использовать следующие правила: снег не мнется в руках в комочек или мнется с трудом - влажность воздуха примерно 50-70%; если снег хорошо мнется в комочек, влажность находится в диапазоне 70-90%; если при сжатии такого комочка удалось легко выдавить из него воду, значит, влажность приближается к отметке в 90-100%.

Для выбора смазки важен также *вид кристалла снега и* получающейся *снежной поверхности*. Падающий или свежий снег - наиболее критическая ситуация для смазки. Острые кристаллы требуют мази, которая не допускает проникновения кристаллов снега, а при более высоких температурах она должна обладать еще и водоотталкивающими свойствами. Влажный снег требует наложения на поверхность лыжи водоотталкивающих мазей и накатки крупных желобков на скользящую поверхность. Мелкозернистый снег и острые кристаллы требуют накатки узких, более мелких желобков. Более старый, лежалый снег при средних зимних температурах требует накатки средних желобков. Вода и большие, круглые снежные кристаллы требуют накатки крупных желобков.

Еще одним фактором, влияющим на процесс взаимодействия лыж со снегом, является *ветер*. Ветер легко может изменить картину поверхности снега. По переметенному ветром снегу лыжи, как правило, скользят плохо. Это происходит потому, что частицы снега дробятся на более мелкие, которые трутся друг о друга, в результате чего снег становится более плотным. Большая плотность поверхности увеличивает площадь контакта между лыжей и снегом, что ведет к более высокому трению [6].

Измерение коэффициента трения скольжения тела можно провести несколькими способами.

Первый способ заключается в измерении с помощью динамометра силы, с которой нужно тянуть брусок с грузами по горизонтальной поверхности, для того чтобы он двигался равномерно. Эта сила равна по модулю силе трения, действующей на брусок. С помощью того же динамометра можно найти вес бруска с грузами *P* (этот вес равен силе реакции опоры *N*). В результате можно вычислить коэффициент трения по формуле: [4].

Второй способ измерения коэффициента трения позволяет определять на опыте не силы, а длины отрезков. Для этого используют равновесие груза, который находится на наклонной плоскости.

Если груз находится в равновесии на наклонной плоскости (см. рис. 1), то сила реакции опоры равна составляющей силы тяжести, перпендикулярной наклонной плоскости (*F2*). А сила трения по модулю равна составляющей силы тяжести, параллельной наклонной плоскости (*F1*).

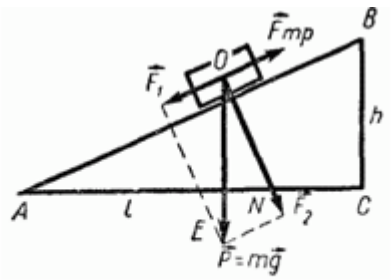

Рис. 1. Равновесие груза на наклонной плоскости

Опыт заключается в том, чтобы, увеличивая постепенно угол наклона плоскости, найти такой угол, при котором груз только тронется с места. При этом сила трения будет равна максимальной силе трения покоя:

$|\overrightarrow{F_{тр}}|=\mu|\overrightarrow{F_2}|$. Так как при этом модуль силы трения равен F_1, то $|\overrightarrow{F_1}|=\mu|\overrightarrow{F_2}|$. Отсюда $\mu=\frac{|\overrightarrow{F_1}|}{|\overrightarrow{F_2}|}$.

Нетрудно показать, что $\frac{|\overrightarrow{F_1}|}{|\overrightarrow{F_2}|}=\frac{h}{l}$. Это следует из подобия треугольников ABC и OEN. Поэтому коэффициент трения равен: $\mu=\frac{h}{l}$ [3].

Третий способ связан с измерением силы трения скольжения с помощью оборудования, представленного в полнофункциональном мобильном лабораторном комплексе, и программного приложения POLITECH iLAB.

В [2] предложена инструкция по проведению лабораторной работы на тему «Исследование зависимости силы трения скольжения от рода соприкасающихся поверхностей и силы нормального давления». Внеся в нее небольшие изменения, можно разработать алгоритм выполнения работы по измерению коэффициента трения скольжения тела.

Для выполнения работы потребуется регистратор данных (DL 100), датчик силы (PTS 106), набор деревянных брусков (PT 2011.16), пластина (PS 2021.2) и набор разновесов.

Ход выполнения работы заключается в выполнении следующего порядка действий: положить пластину на рабочий стол; подсоединить датчик силы к порту №1 регистратора данных; запустить программу регистрации данных; установить время измерения и частоту сбора данных; положить на пластину брусок; прицепить датчик силы к крючку бруска; нажать кнопку «Старт» в программном приложении, чтобы начать сбор данных; тянуть датчик силы до тех пор, пока не начнется скольжение бруска; пронаблюдать на экране компьютера показания датчика силы (он показывает значение силы трения скольжения); по показаниям датчика силы и известному значению веса бруска рассчитать коэффициент трения скольжения; для повышения достоверности экспериментальных данных провести опыт для случаев, когда на бруске находятся различные грузы из набора разновесов.

Учет условий, в которых необходимо проводить опыты по измерению коэффициента трения скольжения лыж (открытое пространство, ветер, снег, влажность, отсутствие источников электрической энергии и т.п.), привел к выбору первого из описанных выше способов.

Опишем сначала ход и результаты экспериментов, проведенных с пластиковыми лыжами при отсутствии смазки.

Цель работы: определить коэффициент трения пластиковой лыжи, скользящей по снегу, при условии отсутствия смазки.

Для проведения эксперимента мы использовали цифровой динамометр DS2-5N с диапазоном измерения 0 - 5 Н и погрешностью измерения 0,001 Н.

Оборудование: кусок пластиковой лыжи, набор грузов (по 100 г каждый), динамометр.

Порядок выполнения работы:

1. Определили вес куска пластиковой лыжи.

2. Положили кусок лыжи на снежную поверхность. На лыжу поставили груз.

3. Прикрепили к лыже динамометр, как можно более равномерно стали тянуть ее по поверхности снега. Зафиксировали показание динамометра.

4. К первому грузу добавили сначала второй, затем третий грузы, каждый раз измеряя значение силы трения.

5. По результатам измерений заполнили таблицу (см. таблицу 1).

6. По результатам измерений определили среднее значение коэффициента трения по формуле:

$$\mu_{cp}=\frac{\mu_1+\mu_2+\mu_3}{3}.$$

7. Рассчитали максимальную относительную погрешность измерения коэффициента трения по формуле:

$$\varepsilon_\mu = \varepsilon_{F_{\text{тр}}} + \varepsilon_P = \frac{\Delta F_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}} + \frac{\Delta P}{P}$$

8. Рассчитали абсолютную погрешность

$$\Delta\mu = \varepsilon_\mu \mu_{\text{ср}}$$

и записали ответ в виде:

$$\mu = \mu_{\text{ср}} + \Delta\mu.$$

Эксперименты проводились в течение трех недель при различной погоде:

- **4 декабря**: температура воздуха -17°С, ветер северо-западный 4 м/с, влажность 98%, осадки в виде снега, снег рыхлый;
- **11 декабря**: температура воздуха -8°С, ветер северо-восточный 2 м/с, влажность 90%, осадков нет, снег рыхлый;
- **12 декабря**: температура воздуха -4°С, ветер северо-западный 3 м/с, влажность 96%, осадки в виде снега; снег мокрый;
- **24 декабря**: температура воздуха -12°С, ветер северо-западный 3 м/с, влажность 85%, осадков нет; снег сухой.

Результаты эксперимента от 04.12.2014 г. приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения коэффициента трения лыж без обработки скользящей поверхности (данные от 04.12.2014 г.)

Номер опыта	Вес лыжи с грузом P, Н	Сила трения $F_{тр}$, Н	μ
1	2,9	0,139	0,048
2	3,9	0,176	0,045
3	4,9	0,225	0,046

Вычисления:

$\mu_1 = \frac{F_{тр_1}}{P_1} = \frac{0,139}{2,9} = 0,048$; $\mu_2 = \frac{F_{тр_2}}{P_2} = \frac{0,176}{3,9} = 0,045$; $\mu_3 = \frac{F_{тр_3}}{P_3} = \frac{0,225}{4,9} = 0,046$;

$\mu_{ср} = \frac{\mu_1+\mu_2+\mu_3}{3} = \frac{0,048+0,045+0,046}{3} = \frac{0,139}{3} = 0,046$;

$\varepsilon_\mu = \varepsilon_{F_{тр}} + \varepsilon_P = \frac{\Delta F_{тр}}{F_{тр}} + \frac{\Delta P}{P} = \frac{0,001}{0,139} + \frac{0,001}{2,9} = 0,00719+0,00034 \approx 0,00753$ (наибольшая относительная погрешность будет в опыте с наименьшим весом, так как знаменатель в этом случае меньше); $\Delta\mu = \varepsilon_\mu \mu_{ср} = 0,046 \cdot 0,00753 = 0,0004$.

Таким образом, полученный опытным путем коэффициент трения скольжения можно записать так: $\mu = 0,046 \pm 0,0004$. Как видим, погрешность измерения очень мала, поэтому ее можно не учитывать.

Результаты экспериментов от 11, 12 и 24 декабря практически ничем не отличались от результатов эксперимента 4 декабря.

Делаем вывод, что *при отсутствии смазки коэффициент трения пластиковых лыж о поверхность снега имеет значение μ=0,046*.

Взяв за основу описанную выше последовательность действий, мы провели эксперименты с пластиковыми лыжами, обработанными различными видами парафиновых смазок.

На нашей лыжной базе имеется определенный запас парафинов различных фирм (и, естественно, разных цен!!!), предназначенных для различных погодных условий. Из этого запаса мы чаще всего используем следующие: Swix: HF4 (-10 - -30), HF6 (-6 - -12), HF7 (-2 - -8), HF8 (+1 - -4); Vauhti: HF012 (0 - -5), HF014 (-2 - -8), HF014 (-6 - -12), HF015 (-10 - -25); Уктус ЛС (0 - -6), (0 - -12), (-8 - -17).

Результаты экспериментальной работы позволили сделать следующий вывод: *парафиновая смазка при любых погодных условиях уменьшает коэффициент трения*, а значит, позволяет достичь большего разгона при прочих равных условиях. Наиболее удачным вариантом парафиновой смазки (с точки зрения скольжения лыж) является:

- при небольшой отрицательной температуре воздуха в условиях повышенной влажности и наличии осадков - парафин Vauhti HF012 (0 - -5), так как она позволяет достичь наименьшего коэффициента трения;
- при достаточно низкой температуре в условиях повышенной влажности и наличии осадков - парафин марки Swix HF4 (-10 - -30);
- при температуре воздуха в пределах от -8 до -12°С в условиях повышенной влажности и отсутствии осадков - парафин марки Swix HF7 (-2 - -8) и Swix HF6 (-6 - -12).

В литературе, посвященной процессу подготовки лыж, говорится о том, что в большинстве случаев наибольший эффект скольжения лыж достигается при одновременном нанесении на ее поверхность парафиновой (нижний слой) и порошковой (верхний слой) смазок [7].

Для подтверждения этих данных и выбора оптимального сочетания парафин + порошок (из тех, которые имеются в наличии на нашей лыжной базе), был проведен ряд экспериментов, результаты которых доказали, что *парафиновая смазка в комплексе с порошком при любых погодных условиях еще больше уменьшает коэффициент трения (в сравнении с нанесенной на лыжи одной только парафиновой смазкой)*, а значит, позволяет достичь еще большего разгона при прочих равных условиях.

Отметим, что наиболее удачным вариантом комплексной парафиново-порошковой смазки (с точки зрения уменьшения коэффициента трения скольжения) является:

- при небольшой отрицательной температуре воздуха в условиях повышенной влажности и наличии осадков - парафин Swix HF8 (+1 - -4) + порошок Vauhti (+2 - -4);
- при достаточно низкой температуре в условиях повышенной влажности и наличии осадков - парафин марки Swix HF4 (-10 - -30) + порошок Swix FC7 (-2 - -30), неплохим (и при этом более дешевым) вариантом является сочетание парафина Vauhti HF015 (-10 - -25) и порошка Vauhti (-2 - -20);
- при температуре воздуха в пределах от -8 до -12°C в условиях повышенной влажности и отсутствии осадков - парафин марки Swix HF7 (-2 - -8) + порошок Swix FC078 (+1 - -10) и парафин Swix HF6 (-6 - -12) + порошок Девятый элемент F9-30 (0 - -15).

В заключение мы провели эксперименты со смазками парафин + эмульсия. Из-за большой стоимости эмульсий на нашей лыжной базе они представлены в небольшом количестве (только марок Swix и Девятый элемент) и для небольшого диапазона температур (например, эмульсия марки Swix имеется только для температурного диапазона от -4°C до +4°C).

Из данных, полученных экспериментально, заключаем: *парафиновая смазка в комплексе с эмульсией при любых погодных условиях позволяет достичь наименьшего коэффициента трения скольжения лыж.* Этот факт полностью объясняет то, почему эмульсия любой фирмы стоит немалых денег. Именно из-за дороговизны эмульсий тренер позволяет нам пользовать ими только в исключительных случаях - при подготовке лыж к значимым краевым и всероссийским соревнованиям.

Данные и выводы, представленные выше, позволили нам разработать рекомендации для спортсменов-лыжников по использованию определенного рода смазочных материалов при тех или иных погодных условиях (таблица 2).

Таблица 2. Рекомендации по использованию лыжной смазки

Парафиновая смазка	
Погодные условия	***Вид парафина***
Небольшая отрицательная температура воздуха (0°C – -5°C); повышенная влажность (85-100%); осадки	Vauhti HF012 (0 – -5)
Достаточно низкая температура воздуха (-15°C – -20°C); повышенная влажность (85-100%); осадки	Swix HF4 (-10 – -30)
Температура воздуха в пределах от -8°C до -12°C; повышенная влажность (85-100%); отсутствие осадков	Swix HF7 (-2 – -8) Swix HF6 (-6 – -12)

Парафиново-порошковая смазка		
Погодные условия	***Вид парафина***	***Вид порошка***
Небольшая отрицательная температура воздуха (0°C – -5°C); повышенная влажность (85-100%); осадки	Swix HF8 (+1 – -4)	Vauhti (+2 – -4)
Достаточно низкая температура воздуха (-15°C – -20°C); повышенная влажность (85-100%); осадки	Swix HF4 (-10 – -30) Vauhti HF015 (-10 – -25)	Swix FC7 (-2 – -30) Vauhti (-2 – -20)
Температура воздуха в пределах от -8°C до -12°C; повышенная влажность (85-100%); отсутствие осадков	Swix HF7 (-2 – -8) Swix HF6 (-6 – -12)	Swix FC078 (+1 – -10) Девятый элемент F9-30 (0 – -15)

Парафиново-эмульсионная смазка		
Погодные условия	***Вид парафина***	***Вид эмульсии***
Небольшая отрицательная температура воздуха (0°С – -5°С); повышенная влажность (85-100%); осадки	Swix HF8 (+1 – -4)	Swix FC 008 L (+4 – -4)
Достаточно низкая температура воздуха (-15°С – -20°С); повышенная влажность (85-100%); осадки	Swix HF4 (-10 – -30)	Девятый элемент F9-40 (-5 – -20)
Температура воздуха в пределах от -8°С до -12°С; повышенная влажность (85-100%); отсутствие осадков	Swix HF7 (-2 – -8)	Девятый элемент F9-70 (-8 – -12)

Следование рекомендациям позволило нам только за последние два месяца семь раз подниматься на пьедестал почета в городских и краевых соревнованиях по лыжным гонкам.

Список использованной литературы

1. Войтвовский, К.Ф. Механические свойства снега: учебное пособие [Текст] / К.Ф. Войтвовский. - М.: Наука, 1977. - 137 с.

2. Демонстрационные и лабораторные работы по физике с использованием полнофукционального мобильного лабораторного комплекса (ПМЛК): методические рекомендации для учителей по использованию ПМЛК на уроках физики в 7-9 классах общеобразовательных школ [Текст] / Е.Ю. Игнатьева. - М.: Просвещение, 2012. - 144 с.

3. Запрудский, Н. И. Экспериментальные исследования по физике, 10 класс [Текст] / Н. И. Запрудский, К. А. Петров. - Минск: Сэр-Вит, 2007. - 54 с.

4. Парфентьева, Н.А. Физика. 10 класс. Тетрадь для лабораторных работ [Текст] / Н.А. Парфентьева. - М.: Просвещение, 2012. - 48 с.

5. **Бусарин, А.Г.** Влияние технологии подготовки гоночных лыж на спортивный результат квалифицированных лыжников-гонщиков [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: http://www.ski-ugra.ru/ru/index.php?catid=83:middle-east&id=661:2011-08-25-09-37-42&Itemid=460&option=com_content&view =article.

6. Смазка лыж для профессионалов [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: http://www.winterlife.ru/teaching/crosscountry/13-smazka-lyzh-dlja-professionalov.html.

7. Смазка лыжная. Варианты. Работа смазки [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: http://skipavilion.ru/2008/05/smazka-lyzhnaya-varianty-rabota-smazki.html.