

УДК 51-76, 612.133
DOI: 10.15372/PMTF202315418

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СНЕГУ

А. Ю. Ларичкин, Д. В. Тихвинский, Д. В. Паршин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: larichking@gmail.com, d.tikhvinskii@ngs.ru, danilo.skiman@gmail.com

Представлен краткий обзор экспериментальных подходов к исследованию трибологии скольжения различных тел по снегу или льду, а также предложены схема, цифровой двойник и вариант трибологической установки. В результате моделирования вращения бака со снегом с целевой скоростью получено распределение деформации конструкции бака, а при тестировании движения образца лыжи по ровной снежной поверхности определена работа силы трения за цикл скольжения. Предложенная установка позволит оценивать эффективность скольжения по снегу при заданных температуре, структуре снега, влажности, а также шероховатости скользящей по снегу поверхности лыжи.

Ключевые слова: снег, скольжение лыжи, трение, эксперимент

Введение. Взаимодействие скользящей поверхности со снегом активно изучается начиная с 1902 г. В 1939 г. было обнаружено, что уменьшение коэффициента трения скольжения происходит вследствие смазывания скользящей поверхности талой водой, которая появляется в результате фрикционного нагрева [1]. В настоящее время установлено, что на трение о снег влияют различные факторы: тип снега (температура, форма гранул, влажность, твердость), площадь контакта, скорость, свойства скользящего тела (материал поверхности, теплопроводность, жесткость, шероховатость поверхности) и т. д. [2].

Лабораторные исследования трения между снегом или льдом и скользящими по нему телами из различных материалов проводились в течение длительного времени [3–7]. Лабораторные измерительные системы (трибометры) можно разделить на два типа: линейные и ротационные (карусельные). Наиболее распространенной лабораторной ротационной установкой является “штифт на диске”. В этой установке диск из снега или льда вращается, а штифт с образцом материала прижимается вертикально к диску, одновременно измеряется сила трения. Преимуществом указанных установок (см. [3, 8, 9]) является возможность достижения достаточно больших скоростей (несколько метров в секунду). Однако при этом образец скользит по одной и той же снежной поверхности, трамбуя и полируя ее. Главным недостатком существующих ротационных трибометров являются малые размеры исследуемых образцов (наибольший исследованный образец имеет размер 70×200 мм [10], также рассматривались образцы размером 40×40 мм [3] и т. п.). Малый размер образцов не позволяет провести исследование гоночной, горной лыжи или лыжи транспортного средства. Еще одной проблемой является накопление талой воды в снегу, в результате чего снег часто превращается в лед. Также талая вода может выводиться наружу под действием центробежных сил [11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-29-01567).

© Ларичкин А. Ю., Тихвинский Д. В., Паршин Д. В., 2024

Широко распространенной лабораторной установкой для измерения трения является линейный трибометр. Испытываемый образец прижимается к снегу или льду и линейно перемещается на заданное расстояние, при этом измеряются силы, действующие на ячейку со снегом, или силы, действующие на тензодатчики, закрепленные на образце. Это позволяет проводить испытания для различных типов снега и исключает проблему истирания снежных гранул и утрамбовки колеи. Первые эксперименты с использованием линейных трибометров проводились при малых скоростях ($0,1 \div 1,0$ м/с) [12–14]. В настоящее время существуют трибометры, позволяющие разогнать образец до скоростей $4 \div 6$ м/с [15–18], что не соответствует целевым скоростям при исследовании скольжения не только беговых лыж, но и сноубордов, горных лыж, лыж снегоходов, самолетов и пр. Современные трибометры оснащаются усовершенствованными тензодатчиками и приборами для измерения скорости, что позволяет разрабатывать новые методы обработки данных [18]. Главный недостаток линейных трибометров — искусственный снег. Поскольку большинство аппаратов находятся в помещениях, для контроля параметров окружающей среды снег создается с помощью снежных пушек и криостатов. Зерна искусственного снега имеют округлую форму, что не соответствует структуре естественного снега. Задачи контроля температуры в зоне контакта лыжи со снегом решались различными способами: от съемки инфракрасной камерой спортсменов на горнолыжных склонах [19] до размещения датчиков температуры непосредственно внутри лыжи [20, 21]. Таким образом, в настоящее время не существует лыжных трибометров, способных проводить тестирование эффективности скольжения образца лыжи по снегу с фиксацией действующей на нее силы трения и контролем температуры в зоне скольжения.

Целью настоящей работы является разработка конструкции масштабного ротационного (карусельного) трибометра и создание его компьютерной модели. Особенностью такого трибометра является его масштаб, позволяющий проводить эксперименты с крупными образцами ($20 \div 50$ см) при скоростях $6 \div 7$ м/с, близких к средним скоростям скольжения лыжников, для определения оптимальной микро- и макроструктуры скользящей поверхности в зависимости от структуры снега и температуры, при которой происходит скольжение.

1. Проектирование установки. В данной работе проектируется трибометр карусельного типа для оценки скольжения по снегу образцов с поверхностью, имеющей различную степень шероховатости, и исследования влияния различных смазок на скольжение в широком диапазоне температур. Диапазоны температуры и скорости вращения барабана должны соответствовать наиболее распространенным гоночным скоростям и температурам. Диапазон температуры составляет $-12 \div +3$ °C [22, 23], при этом скорость скольжения составляет $12 \div 80$ км/ч [24]. Рассматривается ситуация, когда скользящая поверхность находится под одним и тем же углом к поверхности скольжения в течение всего времени контакта, что соответствует классической технике прохождения дистанции.

Предлагается вариант крупногабаритного трибометра, позволяющий поддерживать заданную температуру воздуха в экспериментальной камере, проводить измерения влажности, атмосферного давления, температуры снежного покрова, определять силу трения, а также регулировать нормальное усилие на снег и скорость движения снежного покрова относительно неподвижной поверхности скольжения (ПС). Преимуществом предлагаемого экспериментального стенда является возможность варьировать тип снежного покрова и температуру для образцов, размеры которых близки к размерам лыж, используемых в спорте и технике. Результаты измерений силы трения при различных температурах, влажностях и типах снежного покрова позволят провести анализ влияния этих факторов на скольжение исследуемых поверхностей по снегу и разработать рекомендации по выбору типа смазки, материала ПС, формы отводящих влагу каналов.

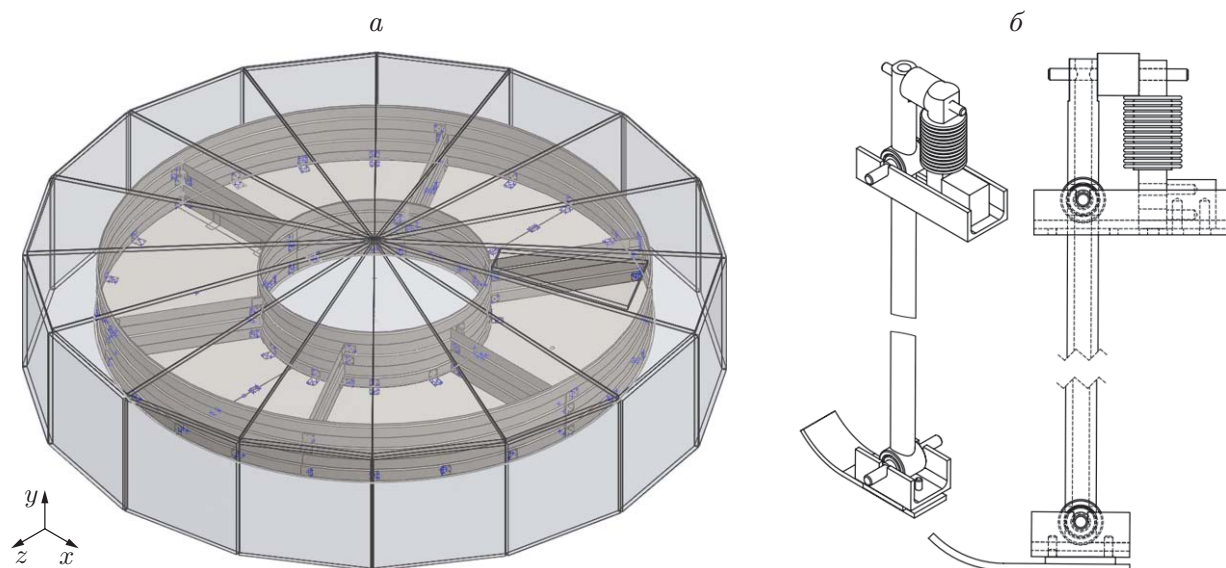


Рис. 1. Схема трибологической установки карусельного типа с термостатической крышкой (а) и измерительной системой (б) для исследования силы сопротивления при скольжении

Конструкция установки включает три независимых элемента (рис. 1):

- 1) бак для снега или иного наполнителя;
- 2) стационарный купол для поддержания заданной температуры;
- 3) блок измерения силы трения.

Бак представляет собой круглую цилиндрическую двухсвязную открытую емкость высотой 300 мм с внешним диаметром $d_1 = 2436$ мм и внутренним диаметром $d_2 = 990$ мм. Внутри бака имеется система из шести ребер, расположенных симметрично на высоте 225 мм от дна бака.

В качестве движущего механизма, который вращает вертикально расположенный бак с регулируемой постоянной угловой скоростью, выбран токарный станок карусельного типа. Блок измерения силы трения фиксируется в захвате станка, что позволяет расположить его вдоль радиуса бака. Бак для снега закрепляется на планшайбе токарного станка и заполняется снегом или иным наполнителем. Поверхность содержимого бака выравнивается таким образом, чтобы она была параллельной поверхности основания.

Результаты моделирования показали, что принятые толщины стенок бака и элементы крепления позволяют эксплуатировать конструкцию, наполненную снегом.

Для увеличения тепловой инерции содержимого бака внутренние поверхности емкости обшиты теплоизоляционными плитами из экструдированного полистирола.

Стационарный купол представляет собой легкий круговой цилиндрический каркас с крышей, обшитый снаружи листами сотового поликарбоната толщиной 3,5 мм. Высота купола составляет 900 мм, цилиндрическая часть имеет высоту 705 мм, диаметр конструкции равен 2980 мм. Купол располагается таким образом, чтобы бак и барабан токарного станка полностью находились внутри купола и не касались его каркаса. Купол подключается к системе криостата LOIP, позволяющей поддерживать под куполом постоянную температуру воздуха в диапазоне $-20 \div +10$ °С при скорости его подачи $1 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Блок измерения силы трения представляет собой силовое измерительное устройство, усилия в котором измеряются одноточечным датчиком изгиба сильфонного типа (Utilcell model 300) с максимальным усилием, приблизительно равным 300 Н. Блок является рычажной системой, в которой длинное плечо рычага соединено с исследуемой ПС, а короткое

плечо — с датчиком усилий. Сменяемая пластина с прикрепленной к ней ПС располагается перпендикулярно поверхности наполнителя бака. Для имитации воздействия веса спортсмена на снежный покров в блок помещается необходимое количество грузов, прижимающих ПС к снежному покрову в баке. Данный измерительный блок имеет вертикальную степень свободы, но его движение в горизонтальной плоскости и вращение вокруг любой оси ограничены. Для исключения врезания ПС в снег при движении шарнирный узел ее крепления снабжен двумя пружинами сжатия, которые возвращают узел в горизонтальное положение.

После установки грузов и начала движения снежного покрова в области касания ПС и снега возникает сила трения, которая передается на датчик усилия с учетом отношения длин плеч рычага измерительного блока.

Управляя положением исследуемой поверхности скольжения вдоль радиуса бака и выбирая угловую скорость вращения барабана токарного станка, можно задавать скорость движения снежного покрова или поверхности наполнителя в области расположения поверхности скольжения в диапазоне $12 \div 80$ км/ч.

Низкая вероятность самопроизвольного расслоения снежной массы и скольжения ее верхних слоев по нижележащим слоям при высоких скоростях поворота бака обусловлена большим значением ($0,57 \div 0,84$) коэффициента сухого трения снега о снег [25].

2. Численное моделирование. До начала сборки установки определялись ее прочностные характеристики. Заметим, что в литературе описаны компактные [3, 10] трибометры карусельного типа. Применение полноразмерного трибометра с возможностью использования образцов беговой лыжи позволят учесть масштабные эффекты, которые невозможно зафиксировать на микростендах.

Для оценки эффективности работы наполненной снегом емкости проведено математическое моделирование деформирования бака под действием массы снега с приложением центробежной нагрузки (рис. 2). Габариты бака определялись с учетом диапазона скоростей движения лыжника и возможностей поворотного механизма (максимальная частота вращения 63 об/мин). Предложена следующая конструкция: внешний диаметр бака 2416,0 мм, высота бака 298,75 мм, высота ребра 228,5 мм, количество ребер 4 (6), диаметр внутреннего цилиндра 1016 мм, внешний диаметр диска основания 2436 мм, внутренний — 990 мм. Масса бака с четырьмя ребрами 68,6 кг, с шестью — 88,6 кг. Материал ребра и вертикальных цилиндров — стальной оцинкованный профлист типа С8 толщиной 0,7 мм, материал дна бака — алюминиевый лист Д16Т. Давление снега моделировалось давлением на стенки бака, линейно возрастающим по высоте, дно бака закреплялось по всем направлениям движения.

Поскольку установка предназначена для определения оптимальных условий скольжения конструкции типа лыжи, для моделирования измерительного устройства с тензодатчиком и верификации результатов экспериментов используется численная модель скольжения лыжи по горизонтальной поверхности, при этом сила приложена в некоторой фиксированной точке на лыже (в зоне лыжного крепления), что соответствует экспериментальной постановке.

Для моделирования скольжения образца лыжи по поверхности внутри бака выполнен численный расчет в пакете ANSYS Mechanical 2020R2. Снег моделировался однородным идеально жестким телом, лыжа — изотропным упругим материалом типа пластика со следующими параметрами упругости: модуль Юнга $E = 5 \cdot 10^9$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,4$. Коэффициент трения между лыжей и снегом полагался равным 0,12. Лыжа приводилась в движение нагрузкой, приложенной к лыжной базе (колодке). Распределения вертикальной и горизонтальной компонент приложенной силы получены в результате оцифровки (открытый пакет Web Plot Digitizer) экспериментальных данных [26].

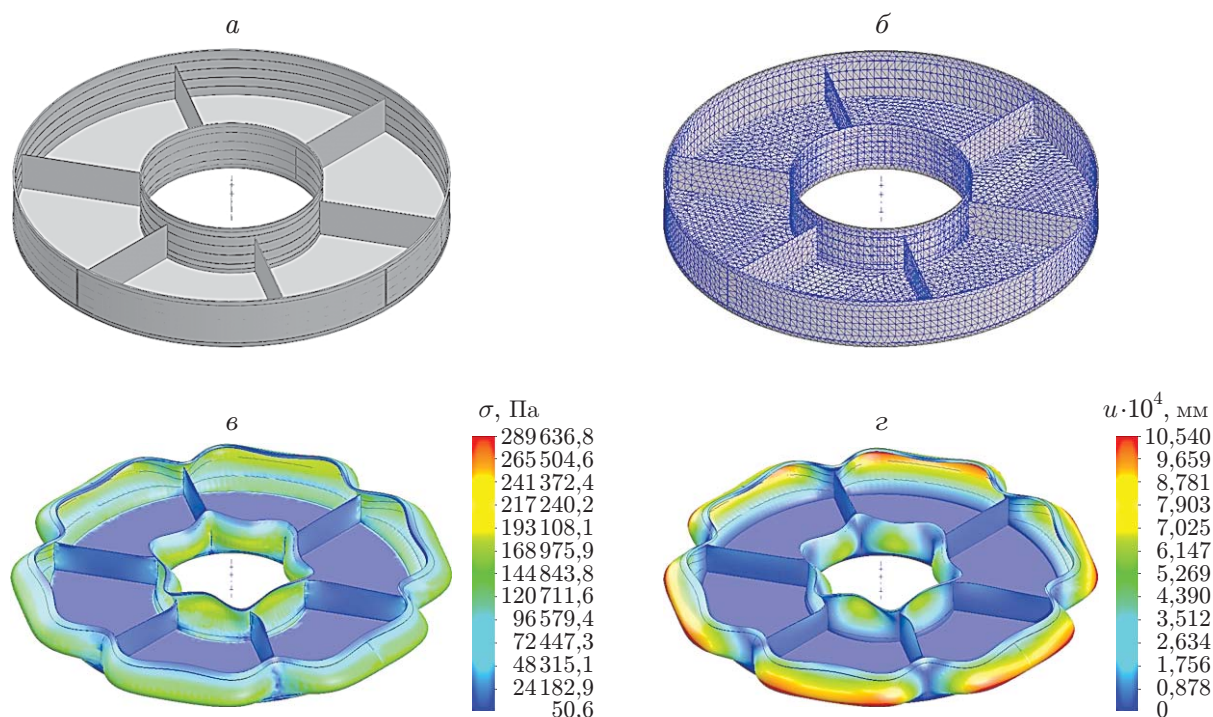


Рис. 2. Модель бака (а), конечно-элементная сетка модели при наибольшем сгущении (б) и деформированная конфигурация бака (в увеличенном масштабе) с распределениями интенсивности напряжений σ (в) и результирующих перемещений u (г)

3. Результаты исследования. Для анализа результатов моделирования необходимо знать деформацию вращающегося барабана, а также силу трения, возникающую при движении тела, моделирующего беговую лыжу, по гладкой ровной поверхности.

С помощью метода конечных элементов проведено математическое моделирование деформирования бака (см. рис. 2,а), заполненного снегом. Основание бака фиксировалось в пространстве, к внутренним стенкам емкости прикладывалось давление p . Давление зависело от вертикальной координаты z по закону линейного распределения $p = \rho g(h - z)$, где $h = 0,302$ м — высота бака; g — ускорение свободного падения; $\rho = 417,219$ кг/м³ — плотность снега. Задача решалась в упругой постановке при малых деформациях и углах поворота. Характеристики материала бака имели следующие значения: модуль Юнга $E = 205$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,29$, предел текучести $\sigma_T = 325$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 385$ МПа. Эти характеристики соответствуют холоднокатаной стали марки AISI 1015. Моделирование проводилось в программном CAD-пакете для инженерного проектирования SolidWorks 2011.

На рис. 2 представлены результаты моделирования для случая наиболее мелкой сетки конечных элементов, позволяющей разбить бак в пакете автоматически. Сетка модели бака (см. рис. 2,б) состояла из четырехузловых конечных элементов в форме тетраэдров, каждый из которых содержал четыре точки гауссова интегрирования. При использовании более мелкой сетки максимальные напряжения и перемещения изменялись незначительно (см. таблицу).

Результаты моделирования нагружения лыжи и ее движения хорошо согласуются с экспериментальными данными для центральной части лыжи и существенно отличаются от результатов экспериментов, полученных для мыска (носки) лыжи: в расчетах верти-

Зависимость результатов моделирования от числа конечных элементов сетки

Модель	Количество узлов	Количество элементов	$u_{\max} \cdot 10^3$, мм	σ_{\max} , МПа
1	24 972	13 080	1,430	0,193
2	38 101	20 263	0,789	0,206
3	52 802	26 588	1,018	0,308
4	56 944	28 568	1,038	0,391
5	75 655	38 399	1,054	0,290

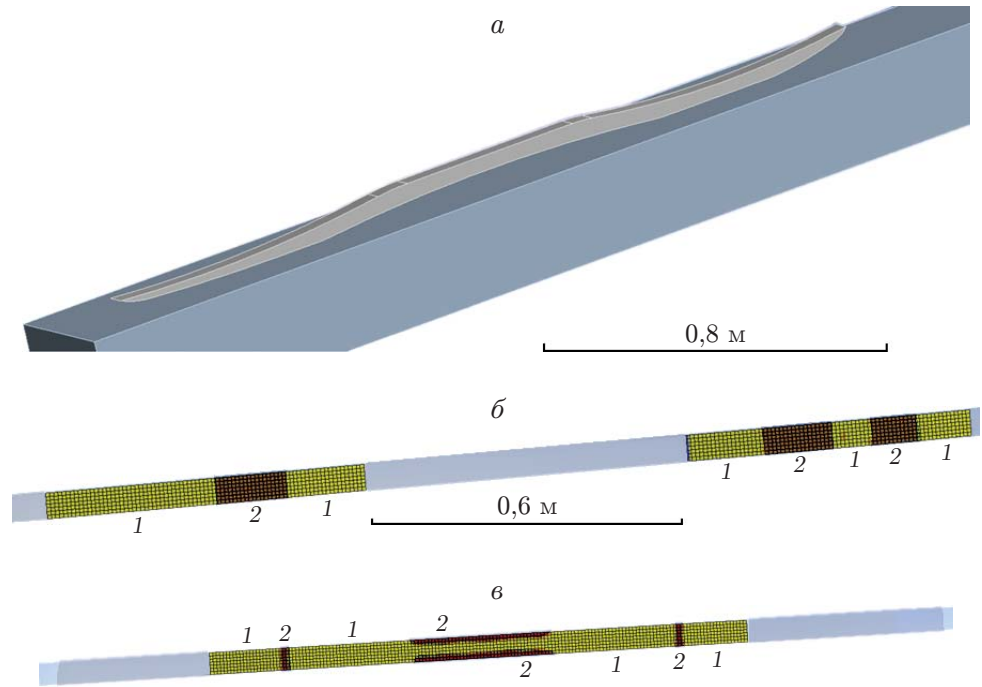


Рис. 3. Результаты моделирования скольжения лыжи:
а — модель лыжи на снежной поверхности, *б* — зоны контакта скользящей поверхности лыжи со снегом в процессе скольжения до нагружения, *в* — зона контакта скользящей поверхности лыжи в момент “разножки” (максимального нагружения); 1 — положение скользящей поверхности лыжи вблизи (менее 1 мм) снежного покрова, 2 — касание лыжи и снежного покрова

кальное перемещение мыска, практически совпадающее с вертикальным перемещением колодки, очень существенное, в то время как в эксперименте вертикальные перемещения мыска и пятки являются незначительными.

Используя данные измерений в силовых ячейках, приведенные в [26], а также среднюю массу лыжника и временные интервалы цикла скольжения, можно вычислить силу трения скольжения. Эту величину можно получить также, используя результаты численного расчета в ANSYS (рис. 3). Пятно контакта в расчете меняется: сначала оно двусвязное (мысок, колодка и пятка не касаются снежного покрова) (см. рис. 3,*б*), с момента появления нагрузки, вдавливающей лыжу в снег, и до момента прекращения нагружения пятно контакта становится односвязным (см. рис. 3,*в*). На рис. 4 показана зависимость силы трения от времени в цикле нагружения лыжи. Полученный результат качественно согласуется с данными [26]. Сила трения достигает максимального значения в момент “разножки”, когда вес тела лыжника сосредоточен на одной лыже.

Экспериментальная установка собрана в Институте гидродинамики СО РАН (рис. 5). Система регистрации силы трения тензодатчиком закреплена на выносном элементе карусельного станка, предназначенном для закрепления фрезы. Проведены тестовые экс-

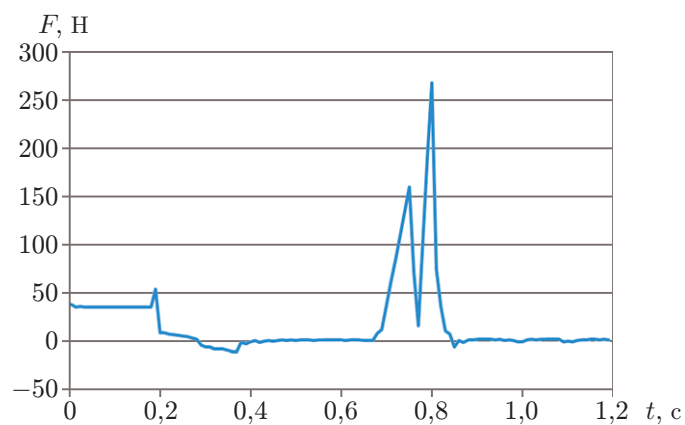


Рис. 4. Зависимость силы трения F от времени, полученная в результате моделирования одного цикла движения лыжи по модельной снежной поверхности

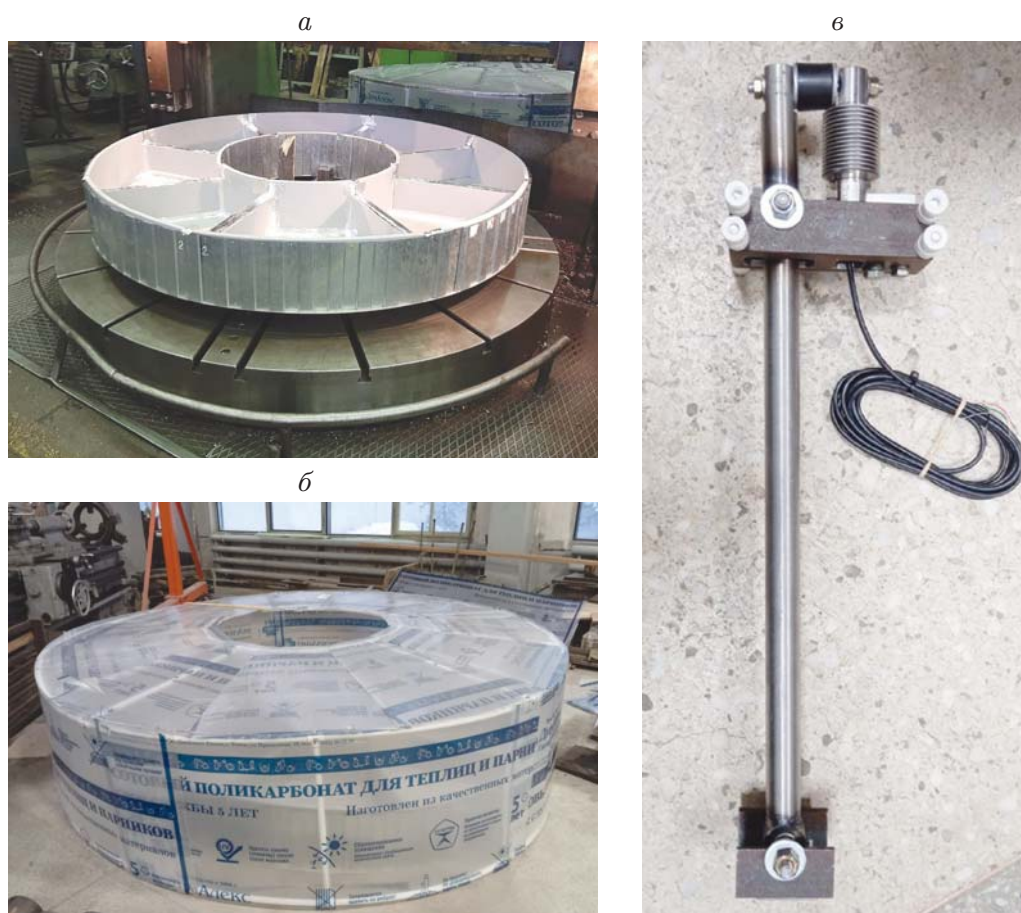


Рис. 5. Элементы экспериментальной установки:

a — бак-барабан для снега, установленный на вращающуюся платформу, $б$ — термокрышка, $в$ — система регистрации силы трения с тензодатчиком

перименты по вращению закрепленного на станке бака. Скорость вращения бака могла изменяться в зависимости от скорости скольжения.

Заключение. Собранная установка является уникальной за счет ее масштаба. Как отмечено выше, большинство трибологических установок карусельного типа являются настольными, т. е. диаметр вращающегося диска не превышает 0,5 м, а размер зоны контакта (скольжения) составляет несколько миллиметров. В то же время протяженность поверхности лыжи, контактирующей со снежной поверхностью, составляет десятки сантиметров, что приводит к изменению структуры снега, плавлению его кристаллов, вытеснению воды по канавкам макроструктуры скользящей поверхности, повторному замерзанию водной пленки и др. [27]. Пренебрежение частью этих процессов допустимо при исследовании скольжения по льду, однако при скольжении по снегу учет всех процессов существен, поскольку при пренебрежении одним из указанных выше факторов погрешность при моделировании может достигать нескольких десятков процентов.

Вместе с тем использование созданной установки имеет ряд ограничений. Ввиду массивности конструкции в настоящее время отсутствует возможность существенного увеличения скорости вращения барабана, что значительно ограничивает диапазон исследуемых скоростей сверху. Значительный интерес представляет исследование скольжения при скоростях, близких к предельным скоростям скольжения на беговых лыжах и к средним скоростям скольжения на горных лыжах ($70 \div 120$ км/ч), что невозможно при использовании данной установки. Планируется разработка устройства вращения для сконструированного бака, которое при небольшой массе позволит раскручивать бак до скорости 5 об/с, соответствующей предельной скорости движения горнолыжника. Также это позволит решать новый класс задач, лабораторное моделирование которых в настоящее время не проводится. Кроме того, с использованием результатов исследования указанного выше диапазона скоростей можно моделировать движение скоростных транспортных средств по снежной поверхности (лыжи самолетов, снегоходов и др.). Еще одним ограничением предложенной конструкции является необходимость сохранения температуры поверхности снега при заборе его из окружающей среды. Процедура наполнения бака снегом и его уплотнения занимает не менее 5 мин, что оказывает влияние на температуру снежной поверхности. Эта проблема имеет несколько решений. Во-первых, возможно нагнетание охлажденного криостатом воздуха до достижения необходимой температуры поверхности снега. Для этого необходимо поместить датчик температуры с выносным щупом непосредственно под снежной поверхностью в баке. Во-вторых, возможно размещение на измерительном устройстве конструкции, подобной ратраку (бороны с придавливающей поверхностью), что позволит выровнять температуры в глубине и на поверхности снежного массива. Эти способы не могут применяться совместно, поэтому наиболее эффективным представляется применение комбинации указанных выше решений. Предлагаемая установка моделирует только движение классических лыж, когда поверхность скольжения находится под постоянным углом к поверхности снега. В случае учета изменения этого угла [28] необходимо использовать другую конструкцию устройства фиксации образца лыжи в измерительной системе. Заметим, что скольжение беговой лыжи при изменении угла наклона скользящей поверхности ранее экспериментально не исследовалось.

Используемый подход к конструированию экспериментальной установки позволяет размещать крупногабаритные устройства для измерения выделяющегося при трении о снег тепла и не применять терморегуляторы зоны скольжения [29], поскольку подогрев как беговых лыж, так и горнолыжной экипировки на соревнованиях высокого уровня запрещен. Также предложенная конструкция сменной скользящей поверхности позволяет достаточно быстро ее заменять с целью сравнения эффективности различных техник [30] обработки скользящей поверхности при заданных температуре и структуре снега.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bowden F. P., Hughes T. P.** The mechanism of sliding on ice and snow // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 1939. T. 172, N 949. P. 280–298.
2. **Nachbauer W., Schröcksnadel P., Lackinger B.** Effects of snow and air conditions on ski friction // *Skiing Trauma Safety*. 1996. V. 10, N 1266. P. 178–185. DOI: 10.1520/stp37927s.
3. **Bäurle L., Szabó D., Fauve M., et al.** Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements // *Tribology Lett.* 2006. V. 24. P. 77–84.
4. **Evans D. C. B., Nye J. F., Cheeseman K. J.** The kinetic friction of ice // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 1976. V. 347, N 1651. P. 493–512.
5. **Bäurle L., Kaempfer T., Szabó D., Spencer N.** Sliding friction of polyethylene on snow and ice: contact area and modeling // *Cold Regions Sci. Technol.* 2007. V. 47, N 3. P. 276–289.
6. **Takeda M., Nikki K., Nishizuka T., Abe O.** Friction of the short model ski at low velocity // *J. Phys. Conf. Ser.* 2010. V. 258, N 1. 012007.
7. **Strausky H., Krenn J. R., Leitner A., Aussenegg F. R.** Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime // *Appl. Phys. B: Lasers Optics*. 1998. V. 66, N 5. P. 599–602.
8. **Dumm M., Hainzmaier C., Boerboom S., Wintermantel E.** The effect of pressure on friction of steel and ice and implementation to bobsleigh runners // *The engineering of sport 6*. V. 3. Developments for innovation. N. Y.: Springer, 2006. P. 103–106.
9. **Kietzig A. M., Hatzikiriakos S. G., Englezos P.** Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106, N 2. 024303.
10. **Fauve M., Bäurle L., Rhyner H.** Laboratory device for measuring the friction between ski-base materials and ice or snow // *The engineering of sport 6*. V. 1. Developments for sports. N. Y.: Springer, 2006. P. 251–256.
11. **The engineering approach to winter sports** / Ed. by F. Braghin, F. Cheli, S. Maldifassi, S. Melzi, E. Sabbioni. N. Y.: Springer, 2016.
12. **Bowden F. P.** Friction on snow and ice // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 1953. V. 217, N 1131. P. 462–478.
13. **Montagnat M., Schulson E. M.** On friction and surface cracking during sliding of ice on ice // *J. Glaciology*. 2003. V. 49, N 166. P. 391–396.
14. **Böttcher R., Seidelmann M., Scherge M.** Sliding of UHMWPE on ice: Experiment vs. modeling // *Cold Regions Sci. Technol.* 2017. V. 141. P. 171–180.
15. **Hasler M., Schindelwig K., Mayr B., et al.** A novel ski-snow tribometer and its precision // *Tribology Lett.* 2016. V. 63, N 3. 33.
16. **Lemmettylä T., Heikkinen T., Ohtonen O., et al.** The development and precision of a custom-made skitester // *Frontiers Mech. Engng.* 2021. V. 7. 661947.
17. **Auganæs S. B., Buene A. F., Klein-Paste A.** Laboratory testing of cross-country skis: Investigating tribometer precision on laboratory-grown dendritic snow // *Tribology Intern.* 2022. V. 168. 107451.
18. **Sandberg J., Kalliorinne K., Hindér G., et al.** A novel free-gliding ski tribometer for quantification of ski-snow friction with high precision // *Tribology Lett.* 2023. V. 71. 111.
19. **Ruiz-García I., Navarro-Marchal I., Ocaña-Wilhelmi J., et al.** Development and evaluation of a low-drift inertial sensor-based system for analysis of alpine skiing performance // *Sensors*. 2021. V. 21, N 7. 2480.
20. **Schindelwig K., Halser M., van Putten J., Rohm S.** Temperature below a gliding cross country ski // *Procedia Engng.* 2014. V. 72. P. 380–385.

21. **Okajima J., Okabe T., Miyamoto M., et al.** Experimental and numerical evaluation of temperature variation by frictional heating at the interface between snow and ski // J. Biomech. Sci. Engng. 2020. V. 15, N 1. 19-00507.
22. **Wagner W., Horel J. D.** Observations and simulations of snow surface temperature on cross-country ski racing courses // Cold Regions Sci. Technol. 2011. V. 66, N 1. P. 1–11.
23. **Breitschädel F., Klein-Paste A., Løset S.** Effects of temperature change on cross-country ski characteristics // Procedia Engng. 2010. V. 2, N 2. P. 2913–2918.
24. **Elfmark O., Docter H., Sandbakk Ø., Kocbach J.** The influence of sub-technique and skiing velocity on air drag in skating style cross-country skiing // Sports Engng. 2023. V. 26, N 1. 37.
25. **Casassa G., Narita H., Maeno N.** Measurements of friction coefficients of snow blocks // Ann. Glaciology. 1988. V. 13. P. 40–44.
26. **Vähäsöyrinki P., Komi P. V., Seppälä S., et al.** Effect of skiing speed on ski and pole forces in cross-country skiing // Med. Sci. Sports Exercise. 2008. V. 40, N 6. P. 1111–1116.
27. **Паршин Д. В., Гайфутдинов Р. А., Коптюг А. В., Чупахин А. П.** Механика скольжения лыж по снегу: современное состояние и перспективы // ПМТФ. 2023. Т. 64, № 4. С. 161–177.
28. **Леготин С. Д., Обносов К. Б., Ривлин А. А.** Механика горных лыж: поворот с боковым проскальзыванием и вибрацией на карвинговых лыжах // Рос. журн. биомеханики. 2022. Т. 26, № 3. С. 29–44.
29. **Пронин С. П., Березников А. А.** Исследование коэффициента трения скольжения пластиковой лыжи по снегу при ее подогреве // Ползунов. альманах. 2019. № 4. С. 52–54.
30. **Бусарин А. Г.** Влияние технологии подготовки гоночных лыж на эффективность тренировочного и соревновательного процесса квалифицированных лыжников-гонщиков: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. Набережные Челны: Кам. гос. акад. физ. культуры, спорта и туризма, 2009.

*Поступила в редакцию 23/X 2023 г.,
после доработки — 23/X 2023 г.
Принята к публикации 30/X 2023 г.*
