

МИНИСТЕРСТВО СПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ «ЦЕНТР СПОРТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ  
СБОРНЫХ КОМАНД РОССИИ»

АНАЛИТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФГБУ «ЦЕНТРА СПОРТИВНОЙ  
ПОДГОТОВКИ СБОРНЫХ КОМАНД РОССИИ»

*Для ограниченного пользования*

**Выпуск 2**

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БОБСЛЕЕ**

*Обзор материалов зарубежных исследований*

Рекомендовано к изданию методической комиссией  
при Экспертном совете по вопросам организации  
подготовки и участия спортивных сборных команд  
Российской Федерации в Олимпийских играх  
Минспорта Российской Федерации



ТВТ Дивизион  
Москва 2012

Материалы исследований подготовлены на основании материалов НИИР, выполненных Кубанским государственным Университетом физической культуры, спорта и туризма и научно-исследовательским институтом проблем физической культуры и спорта КГУФКСТ в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Минспорта России на 2012 год

*Редакционная коллегия ФГБУ «Центр спортивной подготовки сборных команд России»:*

А.М. Кравцов (главный редактор), А.Г. Абалян,  
С.П. Евсеев, Е.Б. Мякинченко, Т.Г. Фомиченко,  
С.Л. Хоронюк, М.П. Шестаков (зам. главного редактора),  
Ю.Н. Шилин (ответственный секретарь)

Современные технологии в бобслее: Обзор материалов зарубежных исследований. Выпуск 2. – М.: ТВТ Дивизион, – 2012 – 208 с.

ISBN 978-5-98724-

Информационные материалы содержат описание особенностей применения различных современных компьютерных технологий для проектирования, как бобслейных саней в целом, так и отдельных их компонентов, а также варианты наиболее рационального размещения в них членов экипажа.

Наряду с этим в материалах сборника предлагаются наиболее эффективные методы проектирования санно-бобслейных трасс и проверки их соответствия установленным требованиям.

Сборник предназначен для тренеров и спортсменов сборных команд, а также специалистов различных научных направлений, принимающих участие в разработке инновационных технологий для проектирования современного материально технического обеспечения в бобслее.

УДК

ISBN 978-5-98724-

© Минспорта России, 2012  
© Оформление, ТВТ Дивизион, 2012

1. ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕВЕРСИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА) И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ.....	5
2. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И ПОЗ БОБСЛЕЙНОГО ЭКИПАЖА.....	13
3. УРОКИ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ БОБА.....	26
4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БОБА И ЭКИПАЖА МУЖСКОЙ ДВОЙКИ.....	39
5. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХМЕСТНОГО БОБА.....	48
6. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВУХМЕСТНОГО БОБА.....	74
7. ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ БОБСЛЕЯ ПОСРЕДСТВОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ.....	76
8. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАРТОВОГО РАЗГОНА В МУЖСКОМ БОБСЛЕЕ.....	91
9. ЛАБОРАТОРНЫЙ ТЕСТ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЛАКТАТНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ РАЗБЕГЕ В БОБСЛЕЕ.....	100
10. АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СКОЛЬЖЕНИЯ ПОЛОЗЬЕВ ОДИНОЧНЫХ САНЕЙ (ТОБОГГАНА) ПО ЛЬДУ.....	120

11. РАЗРАБОТКА, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ БОБСЛЕЙНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ СПОРТСМЕНОВ-ОЛИМПИЙЦЕВ .....	130
12. ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ, СТРУКТУРЫ И ГИДРОФОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ТРЕНИЕ ЛЬДА .....	146
13. ТРЕНИЕ ЛЬДА: ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ....	147
14. ПОВРЕЖДЕНИЕ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ НА СТАРТЕ САННО-БОБСЛЕЙНОЙ ТРАССЫ.....	148
15. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ РУЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ИЗГИБОВ ЛЕЗВИЙ КОНЬКОВ И ПОЛОЗЬЕВ БОБСЛЕЙНЫХ САНЕЙ .....	165
16. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ МЕЖДУ СТАЛЬЮ И ЛЬДОМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛОЗЬЕВ ДЛЯ БОБСЛЕЙНЫХ САНЕЙ.....	180
17. ПРОЕКТИРОВАНИЕ САННО-БОБСЛЕЙНЫХ ТРАСС И ПРОВЕРКА ИХ СООТВЕТСТВИЯ УСТАНОВЛЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ .....	187

## ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕВЕРСИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА) И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ

*Reverse engineering, CFD analysis push U.S. Bobsled Team down high-tech design path  
([http://www.geomagic.com/en/solutions/us\\_bobsled.php](http://www.geomagic.com/en/solutions/us_bobsled.php))*

Разгон боба на старте играет чрезвычайно важную роль в бобслее; сила этого разгона и сила тяжести — это единственные две силы, которые разрешено использовать во время соревнований. Тем более вызывает удивление тот факт, что именно бобслейные сани, которые не требуют моторной тяги и имеют на первый взгляд простую аэродинамическую конструкцию, могли привлечь внимание бывшего гонщика NASCAR (Национальной ассоциации автогонок на серийных автомобилях) Джеффри Бодайна и специалиста по конструированию автомобильных шасси и подвесок Боба Кунео.

Именно это послужило началом нынешних успехов национальной команды США по бобслею. Во многом благодаря усовершенствованиям, внесенным в конструкцию боба при реализации совместного проекта Бодайна и Кунео, получившего название «Некоммерческий проект по бобслею Во-Дуп», команда США завоевала золото в соревнованиях женских двоек, а также серебро и бронзу в заездах мужских четверок на олимпийских играх 2002 г. в Солт-Лейк-Сити. (В названии их совместного проекта «Некоммерческий проект по бобслею Во-Дуп», слово Во-Дуп представляет собой комбинацию имени Bodine (Бодайн) и названия компании Кунео «Chassis Dynamics».)

Однако Кунео намеревается закрепить достигнутый успех путем создания новых конструкций двух — и четырехместных саней с применением моделирования, основанного на вычислительной аэрогидродинамике (ВАГД). Он воспользовался опытом специалистов из компаний Capture 3D Inc., Geomagic и Технологического института

штата Массачусетс при создании трехмерной компьютерной модели боба и выполнении ВАГД-анализа.

По сравнению со стандартами, действующими в других олимпийских видах спорта, на развитие бобслея в Соединенных Штатах выделяется один из самых малых по величине бюджетов. С 1960 по 1990 годы команда была вынуждена работать на бобах, используемых ранее европейскими командами. В настоящее время американская команда по бобслею осуществляет проектирование, испытание и производство своих саней за счет менее одной десятой бюджета, который тратится на аналогичные цели в европейских странах.



Кунео принимает участие в конструировании бобслейных саней для команды США с 1992 года, как раз с того времени когда Бодайн начинает оказывать содействие американским бобслеистам как в тренировочном процессе, так и в приобретении оборудования. Годами они вместе работали над усовершенствованием и модификацией гоночных автомобилей Бодайна в рамках NASCAR.

Имея опыт работы в области автогонок на протяжении нескольких десятилетий, оба специалиста быстро адаптировались к требованиям скоростного бобслейного спуска, но при этом они вынуждены были начать с традиционных «ручных» методов создания конструкций на основе личного опыта, построения модели из пенопласта и пластмассы и только после этого изготовления окончательного образца саней.

По мнению Кунео, в наш век использования систем автоматизированного проектирования (САПР) это был тупиковый путь, так как данный процесс требовал чрезвычайных затрат труда и времени, но в то время это было все, что они могли сделать.

Кунео осознавал, что следующим логическим этапом было создание трехмерной компьютерной модели, которая могла бы быть использована для проведения исследования с применением методов вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД). В связи с отсутствием данных по разработке САПР для конструирования бобслейных саней, ему, прежде всего, требовалось получить трехмерные изображения саней и спортсменов, создать трехмерную модель и найти правильное решение на основе ВАГД.

Это решение начало приобретать окончательную форму во время дискуссии за круглым столом, проведение которой финансировалось олимпийским комитетом США и в которой приняли участие проектировщики оборудования для ряда других видов спорта, а также инженеры-конструкторы из смежных областей техники. Именно здесь Кунео познакомился с Кимом Блейром (Kim Blair), руководителем отдела спортивных технологий Массачусетского технологического института (МТИ), который занимался разработкой нового программного обеспечения для проведения анализов в области аэродинамики малых скоростей. Блейр согласился предоставить созданные им программы в распоряжение американской команды по бобслею.

Для реализации данного проекта Кунео начал поиски компании для выполнения сканирования двух- и четырехместных саней с находящимся внутри них экипажем. Однако он не смог найти желающих взяться за эту работу. Главная ее сложность заключалась во включении спортсменов в процесс сканирования, поскольку большинство сканеров требовали сохранения членами экипажа неподвижного положения тела на протяжении нескольких часов. Даже простое дыхание в течение этого периода приводило к нарушению необходимой точности сканирования на 50 микрон.

Кунео думал о возможности конструирования модели саней с использованием одной программы автоматизированного проектирования, а модели спортсменов – с применением другой программы, а затем объединить обе модели для проведения ВАГД-испытаний. Од-

нако осуществляющий моделирование конструктор, не являясь сам бобслеистом, не смог бы точно определить различные положения членов экипажа на разных этапах спуска; поэтому моделирование им всех этих положений было бы основано на простых догадках.

Кунео рассказывает о том, что невозможно было дублировать различные позиции спортсменов во время спуска. Можно было создать на компьютере превосходную модель саней, но как только предпринималась попытка поместить туда спортсменов, она становилась ни на что не годной по причине неправильных оценок принимаемых ими положений.

По словам Кунео это происходит по причине того, что *аэродинамические характеристики боба в большей степени соответствуют аналогичным характеристикам мотоцикла, чем автомобиля*. В случае автомобиля его корпус рассматривается в качестве основной аэродинамической единицы. Что касается мотоциклов и бобслейных саней, их основная аэродинамическая единица включает не только их корпус, но и находящиеся в воздушном пространстве людей. Таким образом, *сканирование спортсменов в реальных санях оставалось единственным способом создания точной трехмерной модели и последующего исследования всей аэродинамической единицы в целом*.

### Сканирование на основе оптической триангуляции

Ответ на вопрос о возможности получения точного отражения данных в трехмерной модели Кунео получил, обратившись в компанию Capture 3D, г. Нови, штат Мичиган, предоставляющую услуги по поиску решений при сканировании изображений. Работники Capture 3D взяли на себя выполнение этой сложной задачи, поскольку в их распоряжении было необходимое оборудование для точного фиксирования динамических изображений спортсменов и бобслейных саней.

Таким образом, коллектив сотрудников проекта Во-Дуп отправился в лабораторию компании Capture 3D, взяв с собой по одному двухместному и четырехместному мужскому бобу и четверых спортсменов, членов команды США по бобслею. Там в течение трех дней было выполнено сканирование бобслейных саней и обработка данных с применением расчетных сеток с полигонизированной структурой.



Подготовка к сканированию началась с подъема саней на козлы, подобные тем, что используются для пилки дров. Это было необходимо в целях всестороннего охвата всех геометрических характеристик саней, включая их днище. Затем сани покрывались специальным

порошком для уменьшения отражения от поверхности. Окончательным этапом подготовки служило нанесение на боб маркеров в виде идентификационных штрих-кодов и плоских круглых мишеней белого цвета. Эти маркеры являются составным компонентом применяемой компанией Capture 3D системы цифровой фотограмметрии TRITOP.

В основе системы TRITOP лежит теория триангуляции, заключающейся в использовании двух известных точек для определения местонахождения третьей. Маркеры и отсчетная линейка для позиционирования снимаются зеркальной камерой высокого разрешения в заранее определенных проекциях. Эти проекции объединены во взаимосвязанную группировку в рамках программы TRITOP, которая автоматически распознает и рассчитывает хуз — координаты маркеров и позиционирует их в заданном масштабе.

Затем работники Capture3D ввели определенные системой TRITOP координаты в программу светового сканера ATOS IIe. При выборе места для оптимального положения сканера по отношению к саням учитывались заранее установленные координаты для определения мест сканирования объекта и ориентации полученных данных в общей системе координат боба. Каждое точечное множество (облако точек) из полученных при сканировании данных, имело индивидуальную идентификацию и размещение, что способствовало автоматическому выравниванию данных программой ATOS.

По мнению сотрудника компании Capture 3D Стива Альбрехта основное преимущество применения данной комбинации системы TRITOP и сканера ATOS заключается в более высокой точности отображения более крупных объектов, так как координаты маркеров гарантируют, что сканируемые данные будут иметь строго определенное место в окончательной модели объекта. Он рассказывает, что применение альтернативных технологий лазерного сканирования потребовало бы ориентации и выравнивания значительного количества сканируемых вручную изображений, что представляет собой огромную работу при большом объеме сканирования, как это имело место в данном случае.

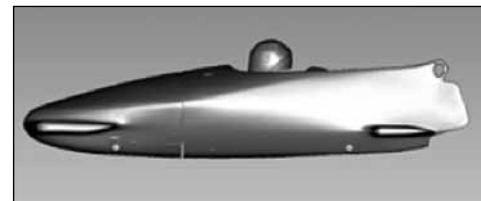
При сканировании бобслеистов вышеупомянутые маркеры носились на их шлемах, которые также покрывались порошком для уменьшения отражения от поверхности. При этом спортсмены сохраняли характерные для бобслейного спуска положения тела в течение 7 секунд, в то время как выполнялась регистрация трехмерных данных и размещения центральных точек маркеров на их шлемах, а также видимых частей тела. После чего проводилось сканирование каждого шлема по отдельности для получения полного определения и более жестких допусков.

Поскольку координаты для шлемов определялись, когда спортсмены находились в положении, принимаемом ими во время соревнования, каждый отдельно сканированный шлем автоматически присоединялся к состоящей из точечных множеств (облаков точек) конечной модели, как будто спортсмены в шлемах все еще находились в санях. *Этот процесс называется цифровой сборкой.* Было получено достаточное количество данных о положении спортсменов для того, чтобы можно было создать законченную модель даже без нанесения маркеров на тело самих спортсменов.

Благодаря комбинации системы TRITOP и сканера ATOS Пе Альбрехту удалось добиться точности до 50 микрон (0,002 дюйма). Для всего процесса в целом потребовалось выполнение 103 сканирований – число, которое могло бы быть значительно больше, если бы сканер ATOS не был бы рассчитан на сканирование таких крупных объектов.

## Моделирование В-сплайновых поверхностей

После того как были получены и упорядочены данные сканирования для всех саней, спортсменов и шлемов, Альбрехт, используя программу сканера ATOS, создал стереолитографические (СТЛ) файлы или полигонизированные расчетные сетки. Затем эти СТЛ-файлы были направлены сотрудникам компании Geomagic для окончательной разработки трехмерных моделей.



Срджан Уросев, старший специалист по технико-экономическому анализу компании Geomagic в Детройте, штат Мичиган, ввел СТЛ-файлы в программу Geomagic Studio. Программа Geomagic Studio автоматически создает точную цифровую модель любого физического объекта на основе ввода данных из трехмерных сканеров.

Уросев подготовил предварительное черновое изображение каждого боба с применением функции обработки поверхностей программы Geomagic Studio и там, где это было необходимо, выполнил необходимую коррекцию ранее полученных данных.

Сначала Уросев работал над данными сканирования саней и спортсменов по отдельности, затем он объединил их для создания конечной модели. Он одновременно выполнял выравнивание данных, регистрируемых в процессе каждого сеанса сканирования целевых объектов. Им также были построены плоскости и оси, проходящие

через основание каждого боба, чтобы использовать их для выравнивания с применением пакета программ автоматизированного проектирования.

Уросев рассказывал, что обычно выполнение подобной задачи у применяющего обратный инжиниринг проектировщика занимает несколько недель, но благодаря программе Geomagic Studio, ему потребовалось всего лишь два-три часа для построения каждой модели.

В конце концов, остались две модели двухместных саней и две модели четырехместных. Для обеспечения соответствия полей допуска Уросев сопоставил окончательные модели В-сплайновых поверхностей с оригинальными STL-файлами. Окончательные файлы были направлены для обработки в Массачусетский технологический институт в виде сформированных по международному стандарту файлов В-сплайновых поверхностей.

Массачусетский технологический институт в настоящее время работает с данными файлами над выполнением ВАГД-анализа, который может занять несколько месяцев (период времени, который Кунео согласен подождать).

«Мы, действительно, с нетерпением ожидаем этого следующего этапа», — говорит Кунео. — «Конечно, это амбициозные планы, но было бы здорово воспользоваться полученными результатами, чтобы вовремя спроектировать новую конструкцию боба к зимним олимпийским играм 2006 года в Турине, Италия».

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И ПОЗ БОБСЛЕЙНОГО ЭКИПАЖА

*Automated aerodynamic optimization of the position and posture of a bob-sleigh crew* Andreas Winkler and Albert Pernpeintner  
(*Procedia Engineering*, — 2010, — № 2, — pp. 2399-2405)

Предшествующие исследования, проводимые Моталлеби и соавторами (Motallebi et al.) [1], Дабнички и соавторами (Dabnichki et al.) [2] и Винклером и соавторами (Winkler et al.) [3], продемонстрировали значительную зависимость аэродинамического сопротивления от положения и позы разгоняющего. В то время как положение пилота является практически неизменным благодаря фиксации рулевого механизма и размерам обтекателя, для разгоняющего существует несколько степеней свободы. Применение цифровых методов моделирования и испытаний в аэродинамической трубе с упрощенным представлением экипажа [3] свидетельствует о том, что **максимальный наклон разгоняющего не приводит к минимизации аэродинамического сопротивления.**

*В области аэродинамики применяется три главных способа анализа поля потока и его влияния на исследуемое физическое тело.* При проведении опытов в полевых условиях возникает проблема разграничения влияния различных физических сил на результативность бобслея. Полномасштабные испытания в аэродинамической трубе могут отличаться высокой эффективностью при анализе поз экипажа. Однако для подобных испытаний требуется наличие должным образом сконструированной аэродинамической трубы достаточно больших размеров и квалифицированного персонала, осуществляющего подготовку, проведение и интерпретацию результатов эксперимента. Для испытаний в аэродинамической трубе с применением выполненных в меньших масштабах болидов требуются ресурсы на создание сложных моделей боба и экипажа соответствующих габаритов. При этом

для исследований различных параметров требуется постоянное взаимодействие разработчика с такого рода уменьшенной моделью.

Еще одним способом, позволяющим избежать этих трудностей, является проведение полностью автоматизированных исследований экипажа на основе вычислительной аэродинамики (ВАГД).

**Во-первых**, этот способ избавляет разработчика от частых взаимодействий с выполненной в уменьшенном размере моделью. **Во-вторых**, правильно разработанная вычислительная модель экипажа может затем легко быть адаптирована к биометрическим показателям других членов экипажа. В целях демонстрации потенциальных возможностей данного метода применялся программно-аппаратный комплекс для автоматизированной разработки аэродинамических форм (АРАФ), предложенный Винклером и соавторами (Winkler et al.) [4], который позволяет осуществлять оптимизацию аэродинамических характеристик универсальной модели бобслейного экипажа.

Таким образом, была создана модель контура экипажа, учитывающая типичные биометрические характеристики человека. Для анализа поля потока вокруг каждого варианта модели контура экипажа выполнялось моделирование, основанное на вычислительной аэродинамике, и для нахождения оптимальной позы и положения экипажа был использован алгоритм оптимизации.

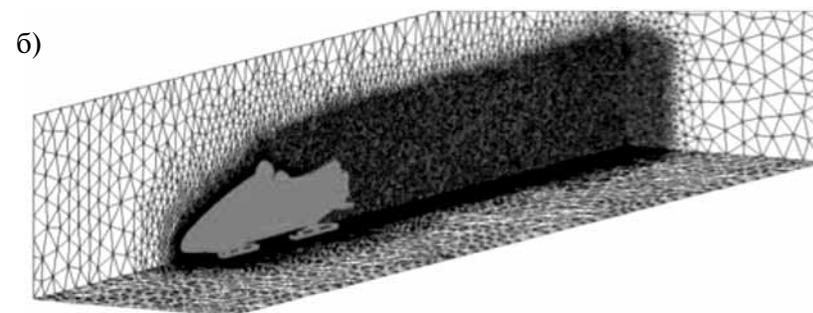
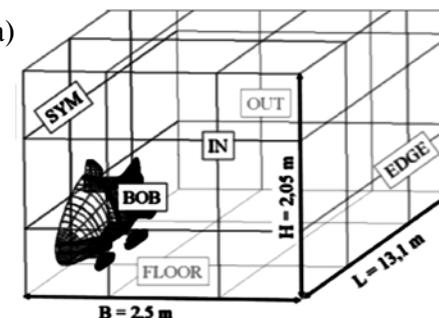
### Моделирование на основе вычислительной аэродинамики (ВАГД-моделирование)

Область потока вокруг бобслейного болида показана на рисунке 1 (слева). Для построения модели применялась неструктурированная расчетная сетка. Она состояла примерно из 4,5 млн. элементов, при этом слои, граничащие с болидом, были разделены на 10 элементов, перпендикулярных стенке. Было сделано допущение, что свободный (набегающий) поток движется параллельно центральной оси болида, что позволило разделить пополам все геометрические параметры, тем самым сэкономив 50% времени вычислений. Типичную расчетную сетку можно видеть на рисунке 1 (справа).

ВАГД-моделирование поля потока вокруг болида осуществлялось с помощью пакета программ ANSYS CFX. Предполагалось, что

поток является равномерным, несжимаемым, вязким и турбулентным. При этом применялись метод RANS (англ. Reynolds-averaged Navier-Stokes – уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу) и модель турбулентности Ментера (модель переноса сдвиговых напряжений) [5].

Рисунок 1. Область потока вокруг бобслейного болида:  
а) область потока, б) типичная сетка для моделирования на основе вычислительной аэродинамики



Моделирование потока выполнялось с применением 75% смешанного фактора для пространственной аппроксимации конвекционных потоков в целях обеспечения надежной сходимости процесса ВАГД-моделирования. Граничные условия аэродинамического моделирования показаны в таблице 1.

Таблица 1. Граничные условия ВАГД-моделирования

Граница	Граничное условие	Граница	Граничное условие
IN (ВНУТР.)	Скорость входящего потока $V=36,11$ м/с	EDGE (КРАЙ)	Преграда (стенка) со свободным проскальзыванием потока
OUT (ВНЕШН.)	Разница давления на выходе $\Delta p = p_{OUT} - p_{\infty} = 0$	SYM (СИМ.)	Симметрия
FLOOR (ДНО)	Преграда без проскальзывания потока $V_{FLOOR} = 36,11$ м/с	BOB (БОБ)	Преграда без проскальзывания потока
TOP (ВЕРХ)	Преграда со свободным проскальзыванием потока		

Имитационное моделирование осуществлялось при температуре окружающего воздуха  $T_{\infty}=0^{\circ}$  и внешнем давлении  $p_{\infty} = 1$  атм. Для данных условий процесса ВАГД-моделирования потребовалось примерно 36 часов работы центрального процессора для создания одного варианта формы болида.

### Модель экипажа и параметризация

Типичные положения тела и позы членов экипажа показаны на рисунке 2 (сверху). Разгоняющий должен занимать свое место и принимать соответствующую позу позади пилота, то есть в пространстве, ограниченном пилотом, боковыми стенками, дном и задней частью боба. Таким образом, разгоняющий может менять свою позу путем сгибания или разгибания позвоночника, и может также перемещаться вперед или назад, чтобы изменить свое положение относительно оси X.

Для преодоления геометрической сложности строения экипажа и внутренней части боба была создана упрощенная модель экипажа, как показано на рисунке 2 (внизу). На рисунке 2 также указаны некоторые параметры модели. Нижняя часть тела экипажа, в том числе ноги, была отсечена и заменена горизонтальной плоскостью сечения. В основе моделирования тел членов экипажа лежат биомеханические свойства позвоночника и рук [6].

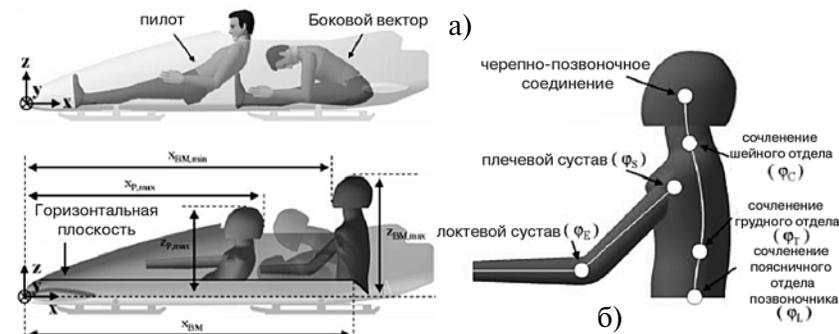


Рисунок 2. Типичные положения тела и позы членов экипажа:

а) типичные положения и позы экипажа (сверху) и модель экипажа с разными позами разгоняющего (внизу); б) основные параметры биомеханической модели экипажа

Основные биомеханические параметры показаны на рисунке 2 (б). Моделирование позвоночника выполнялось с помощью соединения сплайновыми кривыми сочленений поясничного отдела позвоночника, грудного отдела позвоночника, шейного отдела позвоночника и черепно-позвоночного соединения. Изменение позы могло осуществляться путем регулирования углов, образуемых суставами  $f_L$ ,  $f_T$  и  $f_C$ . Вертикальная поза в положении сидя характеризуется нулевым значением всех трех углов позвоночных сочленений. Два примера поз разгоняющего показаны на рисунке 2 (внизу).

Движение рук моделировалось с учетом строения плечевого и локтевого суставов, соединяемых друг с другом прямыми линиями, представляющими плечо и предплечье. Размеры тела были получены из биометрической базы данных компьютерной программы CATIA V5, предназначенной для автоматизированного проектирования. При этом для пилота и разгоняющего были выбраны габариты мужчин атлетического телосложения ростом 186 и 198 см, соответственно.

### Процесс оптимизации

Внедрение процесса оптимизации в программно-аппаратный комплекс для автоматизированной разработки аэродинамических

форм (АРАФ) [4] осуществлялось с применением стандартизованного представления в виде формул. *Эта цель предусматривала последовательную реализацию трех этапов. Во-первых*, нужно было выбрать целевую функцию, которая должна была быть подвергнута процессу оптимизации. *Во-вторых*, требовалось выделить важные проектные параметры для модели исследуемой формы на основе предварительных исследований потока и опыта, накопленного в области аэродинамических вычислений. *В-третьих*, необходимо было определить ограничения данных проектных параметров.

Аэродинамической силой, которая оказывает значительное влияние на результативность бобслея, является аэродинамическое сопротивление. Следовательно, целевой функцией, минимизация которой должна быть достигнута, является площадь аэродинамического сопротивления  $C_D \cdot A$ , определяемая с помощью уравнения (1), где  $D$  обозначает аэродинамическое сопротивление, а  $q_\infty$  – давление в критической точке свободного (набегающего) потока.

$$C_D \cdot A = \frac{D}{q_\infty} \quad (1)$$

Как было показано в предыдущих исследованиях, поза разгоняющего оказывает значительное влияние на аэродинамическое сопротивление [1, 2, 3]. Именно поэтому углы  $fL$ ,  $fT$  и  $fC$ , образуемые сочленениями позвоночника разгоняющего, были выбраны в качестве проектных параметров. Положение относительно оси  $x$  разгоняющего  $x_{BM}$  показывает до какой степени разгоняющий может сгибать спину, избегая столкновения с пилотом. В связи с этим положение разгоняющего относительно оси  $x$  ( $x_{BM}$ ) также было выбрано в качестве проектного параметра.

Было проведено сравнение площади аэродинамического сопротивления в двух крайних позициях рук, для которых были установлены соответствующие углы сочленений разных отделов позвоночника и положение относительно оси  $x$ . Эти показатели были рассчитаны на основе формул, приведенных в наших предыдущих исследованиях [3]. Две данные позиции рук показаны на рисунке 3. **В первом случае**, на рисунке 3 (слева), руки находятся в согнутом положении, и разгоня-

ющий сохраняет данную позу, держась руками за раму боба. Это традиционное положение рук в современном бобслее. **Во втором случае**, на рисунке 3 (справа), руки вытянуты вдоль краев обтекателя, и при этом имитируется поза разгоняющего, которую он принимает, держась за боковые стенки боба. Согнутые руки создают площадь аэродинамического сопротивления, равную  $C_D \cdot A = 0,0596 \text{ м}^2$ , для вытянутых рук этот показатель составляет  $C_D \cdot A = 0,0609 \text{ м}^2$ . В связи с этим было принято решение использовать для моделирования позу с согнутыми руками. Таким образом, для решения проблемы оптимизации аэродинамических характеристик позы разгоняющего в бобслее использовались следующие конструктивные параметры:  $f_L$ ,  $f_T$ ,  $f_C$  и  $x_{BM}$ .

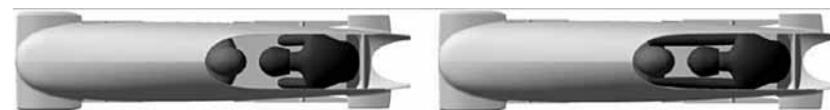


Рисунок 3. Положения рук разгоняющего

Области определения проектных параметров и ограничения процесса оптимизации были установлены на основе биомеханических свойств позвоночника, описанных Капанджи (Karandji) [6], измерений формы болида и опыта аэродинамического моделирования. Прежде всего, следует отметить, что современные бобслейные сани конструируются таким образом, что разгоняющий может принимать безопасное положение тела, только находясь в позе наклона вперед. Поэтому нижние границы углов сочленений поясничного и грудного отделов позвоночника были установлены как  $0^\circ$ . Остальные ограничения углов сочленений были взяты из результатов исследований проведенных Капанджи (Karandji) [6]. Ограничения для  $x_{BM}$  диктовались положением заднего конца боба и требованием избегания столкновения головы разгоняющего с головой или туловищем пилота. Кроме того, было официально установлено безопасное расстояние между двумя шлемами, минимальный предел которого равен 50 мм.

Проектные параметры не были независимы друг от друга, что послужило причиной ряда линейных и нелинейных ограничений. На основании размеров бобслейных саней и биомеханических свойств [6]

было рассчитано, что сумма углов сочленений поясничного и грудного отделов позвоночника не может превышать  $95^\circ$ . В силу связанных с аэродинамикой причин шлем разгоняющего должен находиться в спутном следе шлема пилота. Отсюда следует, что максимальная координата по оси  $z$  ( $z$ -координата) разгоняющего  $-z_{BM,max}$  не должна превышать максимальную  $z$ -координату пилота  $-z_{P,max}$ . Как максимальная  $z$ -координата разгоняющего ( $z_{BM,max}$ ), так и минимальная  $x$ -координата тела разгоняющего ( $x_{BM,min}$ ) зависят от величины углов сочленений позвоночника. Следовательно, функция определения максимальной  $z$ -координаты  $z_{BM,max} = f(f_L, f_T, f_C)$  и функция расчета минимальной  $x$ -координаты  $x_{BM,min} = f(f_L, f_T, f_C, x_{BM})$  являются нелинейными. Суммируя вышесказанное, стандартное представление оптимизации положения тела и позы членов экипажа может быть выражено с помощью уравнений (2) и (3).

<b>Объективная функция и ограничения:</b>	<b>Области определения:</b>	
Минимизировать $C_D \cdot A$ $\varphi_L, \varphi_T, \varphi_C, x_{BM}$	$0^\circ \leq \varphi_L \leq 60^\circ$	(3)
$\varphi_L + \varphi_T - 95^\circ \leq 0^\circ$	$0^\circ \leq \varphi_T \leq 45^\circ$	
$z_{BM,max} \varphi_L, \varphi_T, \varphi_C \geq z_{P,max} \leq 0 \text{ mm}$	$-15^\circ \leq \varphi_C \leq 40^\circ$	
$-x_{BM,min} \varphi_L, \varphi_T, \varphi_C, x_{BM} \geq x_{P,max} + 50 \text{ mm} \leq 0 \text{ mm}$	$2600 \text{ mm} \leq x_{BM} \leq 2800 \text{ mm}$	

Комплекс для автоматизированной разработки аэродинамических форм (АРАФ) [4] обеспечивает полностью автоматизированный итерационный цикл оптимизации формы в рамках выполнения стоящей перед нами задачи аэродинамической оптимизации. Начальным пунктом решения данной задачи служит применение программы с открытыми исходными данными DAKOTA [7], которая предлагает набор различных алгоритмов оптимизации. На основе выбранного алгоритма оптимизации определялся набор проектных параметров, который служил расчетной точкой для ввода в программу автоматизированного проектирования. Расчетная точка переводилась в версию формы болида, которая передавалась на генератор расчетных сеток, где выполнялось автоматическое наложение заданных параметров поля потока на расчетную сетку. Затем сетка переадресовывалась в программу ВАГД-моделирования. Смоделированное поле потока подвергалось автоматическому анализу в целях получения

значения целевой функции. Это значение использовалось затем в алгоритме оптимизации, на основании которого определялась следующая расчетная точка.

Первоначально было неизвестно, обеспечивает ли целевая функция  $C_D \cdot A = f(f_L, f_T, f_C, x_{BM})$  более одного минимума. Поэтому применялся генетический алгоритм оптимизации в целях поиска глобального минимума. *Генетический алгоритм имитирует биологическую эволюцию, то есть в его основе лежат принципы воспроизводства и отбора.* Для этой цели нами были выбраны следующие установочные значения: число расчетных точек в одной совокупности (популяции):  $N_{pop} = 12$ ; число перекрестных группировок данных (скрещиваний) на каждую новую совокупность:  $N_{cross} = 10$ ; число изменений (мутаций) на расчетную точку:  $N_{mut} = 5$ . Скрещиваниям и мутациям подвергались проектные параметры после их двоичного кодирования. Выбранный алгоритм позволяет контролировать нелинейные ограничения посредством применения метода штрафных функций. Для этой цели каждое нарушение ограничения штрафвалось с применением постоянной величины площади аэродинамического сопротивления, при этом допустимым расчетным точкам всегда отдавалось предпочтение перед недопустимыми расчетными точками на всех фазах отбора (селекции).

## Результаты оптимизации

В качестве начала отсчета (контрольной точки) была признана поза полного наклона разгоняющего, соответствующая полному отсутствию разгоняющего. Боб без разгоняющего имеет площадь лобового сопротивления, равную  $C_D \cdot A = 0,0637 \text{ м}^2$ .

На рисунке 4 показаны площади аэродинамического сопротивления в первых 76 расчетных точках. При этом принимались во внимание только допустимые расчетные точки. Начало отсчета показано в виде горизонтальной линии.

*Полученная модель позволила выявить ряд характерных особенностей.* На ее основании можно сделать вывод, что максимальный наклон разгоняющего, очевидно, не приводит к минимальному аэродинамическому сопротивлению. Площадь аэродинамического со-

противления проявляет тенденцию к сокращению при увеличении числа расчетных точек, что указывает на поиск оптимума в пределах пространства проектных параметров. Между несколькими соседними расчетными точками были выявлены значительные различия в площади аэродинамического сопротивления, что служит индикатором исследования пространства проектных параметров. При малом количестве расчетных точек недопустимые расчетные точки преобладают над допустимыми. Это означает, что первоначально создается множество расчетных точек, которые нарушают ограничения задачи оптимизации. Эта тенденция изменяется с увеличением числа расчетных точек, что свидетельствует о проявлении эффекта от накопленного опыта в построении алгоритма, который способствует увеличению точности при определении границ пространства проектных параметров. Самый низкий показатель площади аэродинамического сопротивления, равный  $C_D \cdot A = 0,0595 \text{ м}^2$  был получен в 61-ой расчетной точке. Он немного ниже аналогичного показателя  $C_D \cdot A = 0,0595 \text{ м}^2$  полученного при проведении упоминаемого выше исследования параметров рук.

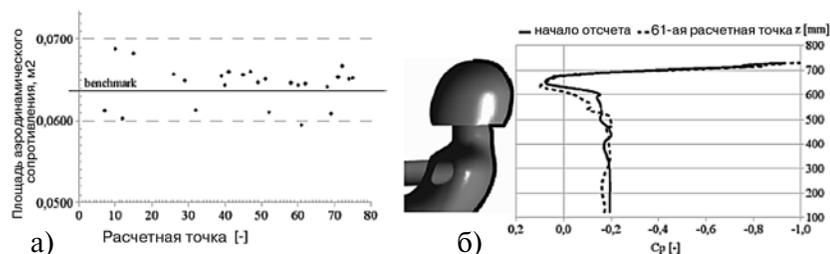


Рисунок 4. Площади аэродинамического сопротивления в первых 76 расчетных точках: (а) площадь аэродинамического сопротивления в анализируемых допустимых расчетных точках, (б) распределение давления на заднюю часть поверхности тела пилота при  $y = 0$

Влияние характерной позы разгоняющего на поле потока показано на рисунках 4(б) и 5(а,б). На рисунке 4 (б) распределение давления на заднюю часть поверхности тела пилота представлено в виде коэффициента давления, рассчитанного на основе местного давления  $p$ , внешнего давления  $p_\infty$  и давления в критической точке потока  $p_{cr}$ .

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (4)$$

На рисунке 4 (а) показана линия на поверхности, на которой проводилось измерение коэффициента давления. На графике представлено изменение коэффициента давления в зависимости от z-координаты точки отсчета и 61-ой расчетной точки. Присутствие разгоняющего вызывает явное сокращение всасывания воздуха с задней стороны тела пилота, в то время как величина всасывания на шлеме остается примерно на одинаковом уровне.

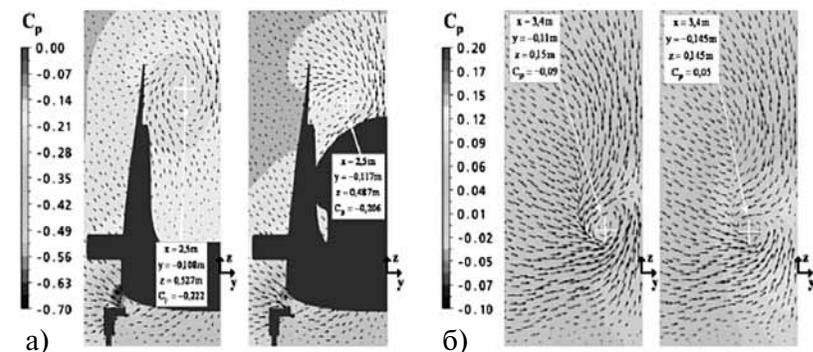


Рисунок 5. Влияние характерной позы разгоняющего на поле потока: (а) коэффициент давления и у-z-компонента скорости потока в точке отсчета (слева) и 61-ой расчетной точке (справа) при  $x = 2500 \text{ мм}$ , (б) коэффициент давления и у-z-компонента скорости потока в точке отсчета (слева) и 61-ой расчетной точке (справа) при  $x = 3400 \text{ мм}$

Предыдущие исследования поля потока [3] свидетельствуют о том, что поток над обтекателем создает завихрение, возникающее с его края. Данное завихрение отличается высокими скоростями вращения, а, следовательно, низкими показателями давления. Поэтому оно служит существенным источником сопротивления давления. Подтверждающие это данные представлены на рисунке 5 (а) для точки отсчета и 61-ой расчетной точки. На данном рисунке показаны у-z-компонента скорости потока и распределение давления в у-z-плоскости при  $x = 2500 \text{ мм}$ . Центр завихрения обозначен

белым крестиком. На рисунке 5 (б) изображены те же самые переменные потока в  $y$ - $z$ -плоскости при  $x = 3400$  мм. На рис. 5 (б) показано завихрение у другого треугольного крыла, которое вращается в противоположную сторону по сравнению с завихрением на рисунке 5 (а). При сравнении рисунков 5 (а) и 5 (б) можно увидеть, что присутствие разгоняющего вызывает изменение расположения и силы завихрений. Центры завихрений перемещаются наружу, и отрицательное давление уменьшается.

### Обобщение и перспективы на будущее

В данной статье было продемонстрировано применение комплекса АРАФ для полностью автоматизированной оптимизации положения и поз экипажа мужской двойки в бобслее.

**В процессе оптимизации было обнаружено:** а) что традиционное положение рук разгоняющего является более эффективным по сравнению с положением, когда спортсмен держится за кромку саней у края обтекателя, и б) что максимальный наклон разгоняющего не обеспечивает минимального аэродинамического сопротивления. *В то же время, правильное положение и поза разгоняющего способствует значительному снижению аэродинамического сопротивления.*

В основе данного процесса оптимизации лежит применение упрощенной модели экипажа, которая может легко регулироваться в зависимости от различных биометрических характеристик экипажа. Рассматривая возможность применения результатов настоящего исследования в отношении мужских четверок в бобслее, **можно предположить**, что с помощью оптимизации поз и положений экипажа в этой разновидности бобслея можно добиться даже еще более значительного уменьшения аэродинамического сопротивления. *При построении модели формы 4-местного болида с экипажем можно легко трансформировать описываемый здесь метод к выполнению этой задачи.*

1. Motallebi F., Dabieliki P. and Luck D.: Advanced bobsleigh design. Part 2: aerodynamic modifications to a two-man bobsleigh. Proc. Instn Mech, Engrs Vol. 218 Part L: J. Materials: Design and Applications, 2004.
2. Dabnichki P., Avital E.: Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh, Journal of Biomechanics 39, pp. 2733-2742, 2006.
3. Winkler A., Pernpeintner A.: The Engineering of Sport 7, Vol.2, In Estivalet M., Brisson P. (Eds.) Improving the Performance of a Bobsleighby Aerodynamic Optimization. Biarritz, 2-6 June. Springer-Verlag France, 2008.
4. Winkler A., Pempeintner A.: Automation of the Aerodynamic shape optimization of a Bobsleigh using computational tools. In: Alam, F. et al (ed.): Proceedings of the 4th Asia Pacific Congress on Sports Technology (APCST), Honolulu, USA, 21-23 September 2009.
5. Menter F.: Improved Two-Equation  $k$ - $\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. NASA Technical Memorandum 103975.
6. Ibrahim A. Kapandji: Funktionclie Anatomic der Gelenke. 4th Edition, Georg Thieme Verlag, 2006.
7. Sandia National Laboratories Employees (2007) Design and Analysis Kit for Optimization and Terrascale Applications (DAKOTA): Version 4.1 User's Manual. SAND2006-6337, Unlimited Release, October 2006, Updated September 2007.

## УРОКИ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ БОБА

*Lessons learned from the aerodynamic shape development process of a bobsleigh*

*Albert Pernpeintner<sup>a</sup>, Andreas Winkler<sup>a\*</sup>*

*<sup>a</sup>Technische Universität München, Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching, Germany*

*(Procedia Engineering, – 2010, – № 2, – pp 2407–2412)*

В рамках проекта, объединяющего специалистов разных научных дисциплин, и в сотрудничестве с малыми и средними предприятиями, а также членами Баварского сообщества по бобслею была выполнена работа по аэродинамической оптимизации формы боба [1,2,3].

**Цель данной разработки** состояла в снижении аэродинамического сопротивления. В то время как в центре внимания ряда предыдущих работ [4,5,6,7,8] находилось усовершенствование отдельных компонентов бобслея, в этот раз процесс оптимизации затрагивал все составляющие боба и экипажа как единого целого. Одна из предпосылок данного процесса заключалась в том, чтобы использовать приборы и методы, доступные для малых и средних предприятий и компаний. Решение поставленной задачи осуществлялось на основе систематического процесса опытно-конструкторской разработки, показанного на рисунке 1.

На предварительном этапе проектирования и разработки применялись преимущественно компьютерные методы, включая систему автоматизированного проектирования (САПР) и программы моделирования на основе вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД-моделирования). В основном ограниченные возможности вычислений неизбежно приводили к применению упрощений на стадиях моделирования деталей формы боба, турбулентности и рабочего состояния. В целях оптимизации отдельных деталей проводились испытания в аэродинамической трубе с применением модели, созданной в уменьшенном масштабе. Модель, выполненная в уменьшенном масштабе, обычно требует упрощения, как формы боба, так и граничных условий, диктуемых особенностями ее рабочего состояния во время эксплуатации.

табе. Модель, выполненная в уменьшенном масштабе, обычно требует упрощения, как формы боба, так и граничных условий, диктуемых особенностями ее рабочего состояния во время эксплуатации.

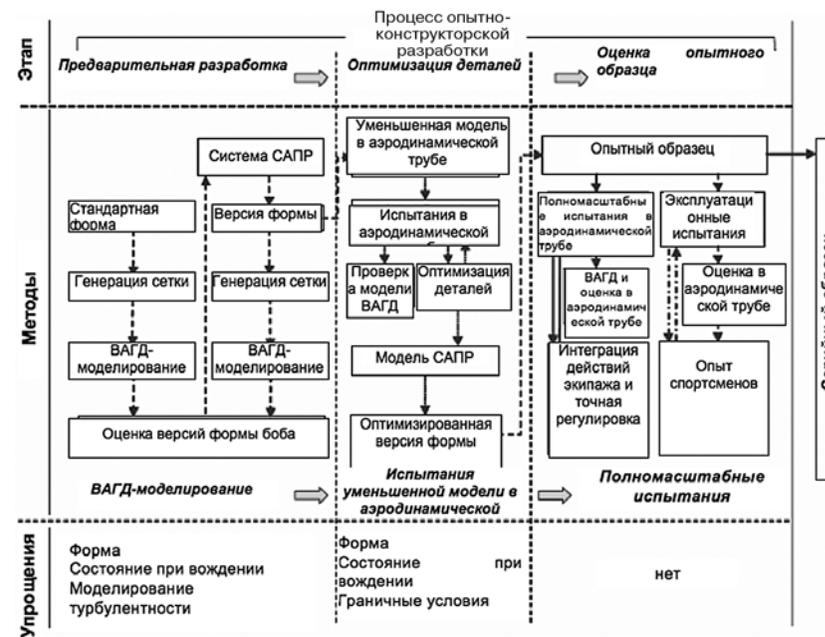


Рисунок 1. Процесс опытно-конструкторской разработки, направленной на снижение аэродинамического сопротивления боба

Дополнительные препятствия возникали под воздействием лимитирующих факторов на стадии испытаний в аэродинамической трубе. И, наконец, на заключительном этапе проводились полевые испытания полномасштабного опытного образца, при конструировании которого не применялось никаких упрощений, что делает возможным его применение для оценки используемых в процессе его разработки вычислительных и экспериментальных методов.

## Этап предварительной разработки

Исходным пунктом любого процесса опытно-конструкторской разработки служит определение его целей. К работе по выявлению критериев усовершенствования спортивного оборудования должны активно привлекаться спортсмены. Однако по причине сложности механических воздействий текучих сред спортсменам трудно или даже невозможно связать ту или иную реакцию спортивного оборудования с определенной характеристикой потока. Именно поэтому задача инженера заключается в том, чтобы воплощать высказываемые спортсменами пожелания в соответствующие технические задания, точно соответствующие требованиям механики жидкости и газов. Например, при выполнении работы по аэродинамической оптимизации боба спортсмены оказались не в состоянии четко ответить на вопрос о возможности использования наиболее благоприятствующего распределения подъёмной силы между передней и задней осями для улучшения динамики управления санями. Кроме того, одним из препятствий для правильного определения целей разработки того или иного предмета спортивного оборудования является психологический аспект. Например, Krieger [9] цитирует следующий отзыв высококвалифицированного пловца о плавательном костюме, созданном по аналогу с акульей кожей: «Мне нравится ощущать его на себе. ... Этот костюм по всеобщему мнению увеличивает скорость плавания, поэтому, когда вы его одеваете — вы плаваете быстрее». Из вышесказанного становится очевидной вся сложность и ответственность задачи по выявлению требований, предъявляемых к процессу опытно-конструкторских разработок в области механики жидкостей и газов.

Тесное сотрудничество со спортсменами играет важную роль не только с точки зрения определения задач опытно-конструкторских разработок. Оно также позволяет повысить эффективность всего процесса разработки благодаря существованию постоянной, надежной и квалифицированной обратной связи со спортсменами при практическом воплощении инженерных идей. *В этом контексте гораздо более продуктивной будет работа со спортсменами, которые не обязательно принадлежат к высшей элите, но обладают определенными*

*техническими навыками, обеспечивающими понимание сути опытно-конструкторских разработок.* Поскольку на каждом последующем этапе реализации проекта стоимость внесения изменений все более возрастает, очень важно наладить взаимосвязь с подобными знающими спортсменами уже на стадии предварительной разработки.

В целях оптимизации того или иного объекта спортивного оборудования необходимо иметь стандартные показатели измерений его аэродинамических характеристик (опорные величины). В связи с тем, что в основе содержания этапа предварительной разработки лежит моделирование с применением вычислительной аэрогидродинамики, соответствующие опорные величины должны быть также рассчитаны в процессе данного цифрового моделирования. Это очень важно, так как даже при наличии опорных величин, полученных экспериментальным путем, они не могут быть использованы в качестве стандартных показателей для ВАГД-моделирования, которое предполагает применение определенных упрощений, как это показано на рисунке 1.

Создание файла с цифровой формой моделируемого объекта является начальным этапом процесса генерации расчетной сетки, который представлен на рисунке 2. Все последующие этапы предполагают взаимодействие пользователя с программным обеспечением, и зависят от качества данного файла с цифровой формой. В этом контексте достаточное качество означает изображение водонепроницаемой формы объекта. Любого рода геометрические ошибки приводят к большим или меньшим затратам времени пользователя для их исправления. В случае бобслея исходные файлы САПР со стандартной формой боба отсутствовали. Поэтому потребовалось преобразовать в цифровую форму существующую форму боба. При оцифровке формы стандартного боба оказалось невозможным сразу же получить его водонепроницаемую цифровую форму. Поэтому создание соответствующей стандартной модели формы боба потребовало применения значительных трудовых затрат.

Еще одна проблема, возникающая в процессе генерации расчетной сетки, связана с форматами файлов. Иллюстрацией может послужить пример на рисунке 2, где показана одна и та же версия боба и экипажа в формате файла STEP, которая была создана с применением

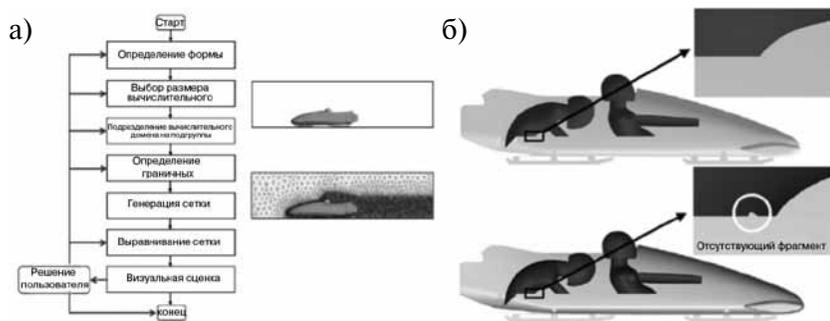


Рисунок 2. Начальный этап процесса генерации расчетной сетки:

- (а) процесс генерации неструктурированной расчетной сетки вокруг боба,  
 (б) геометрическая ошибка при переводе из САПР (вверху) в генератор расчетной сетки (внизу)

программного обеспечения САПР (вверху) и затем импортирована в программу генерации расчетной сетки (внизу). Изображение «верхней версии», полученной с помощью САПР, является безупречной. На нижнем изображении можно видеть, что после импортирования файла в генератор расчетных сеток отсутствует крохотный фрагмент поверхности. Эта ошибка стала причиной нарушения всего процесса генерации расчетной сетки.

После того, как была создана стандартная форма боба и определены ее аэродинамические свойства, было начато выполнение цикла оптимизации на основе применения компьютерного программного обеспечения. Процессу оптимизации подвергалась параметрическая трехмерная модель боба, созданная с применением САПР (3D-CAD-Modell). Кроме того, была применена упрощенная модель экипажа боба (рисунок 3). Она состояла из шлема пилота, горизонтальной плоскости и плоскости с углом наклона  $\theta$ . С ее помощью можно было имитировать разные положения разгоняющего.

Помимо этого были проигнорированы некоторые мелкие детали формы. Неструктурированные расчетные сетки состояли примерно из 3-4 млн. элементов, граничные слои были разделены на десять элементов, перпендикулярных стенке, и была применена модель переноса сдвиговых напряжений Ментера [10], в том числе для функ-

ций стенок. Используя данную исходную установку, мы смогли оценить более 100 различных вариантов формы боба и экипажа.

Результаты этапа предварительной разработки показаны на рисунке 3. Для оптимизированного варианта боба (InnoBob) было зарегистрировано снижение аэродинамического сопротивления примерно на 13% по сравнению с его стандартной формой (RefBob). Наряду с этим применение вычислительных методов обеспечивало дополнительные преимущества для процесса опытно-конструкторской разработки.

Моделирование на основе вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД-моделирование) создает информацию о поле обтекания во всем домене вокруг боба [1]. Эта информация позволила существенно расширить наши знания об аэродинамических свойствах боба.

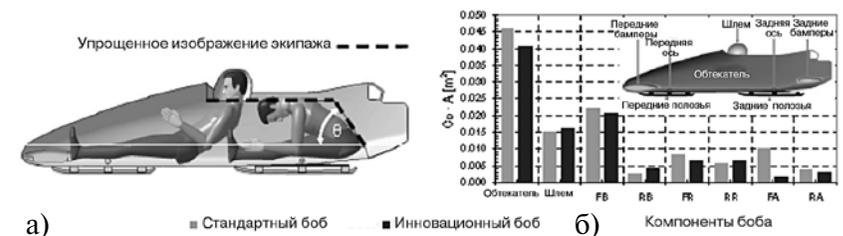


Рисунок 3. Результаты этапа предварительной разработки:

- (а) упрощенное изображение экипажа боба, (б) результат предварительного этапа разработки боба (Сокращения: FB – передние бамперы, RB – задние бамперы, FR – передние полозья, RR – задние полозья, FA – передняя ось, RA – задняя ось)

Например, можно было легко определить вклад различных компонентов боба в суммарное аэродинамическое сопротивление, как показано на рисунке 3.

Аналогичное количество информации для данного числа вариантов формы боба невозможно получить при проведении испытаний в аэродинамической трубе. Кроме того применение вычислительных методов обеспечивает полную автоматизацию цикла разработки [2], что позволяет существенно повысить ее эффективность.

Суммируя вышесказанное, следует отметить, что создание формы боба и в частности преобразование в цифровую форму заданной поверхности для применения в ВАГД-моделировании представляет собой сложный процесс, который может потребовать значительных затрат времени. То же самое относится к обработке файлов. В этом контексте следует согласовать формат файлов с представителями (специалистами) различных дисциплин, участвующих в проекте, уже на начальной стадии работы. С другой стороны, создание параметрической трехмерной модели САПР, включая соответствующие упрощения формы, и оценка различных вариантов формы боба в процессе ВАГД-моделирования служат мощными инструментами, применяемыми на этапе предварительной разработки.

### Фаза оптимизации деталей

Следующий этап процесса опытно-конструкторской разработки включает оптимизацию деталей при испытании уменьшенной модели боба в аэродинамической трубе.

*К основным преимуществам испытаний в аэродинамической трубе относятся* возможность выполнения эффективных измерений переменных интегрального потока, например, аэродинамических коэффициентов, и полный охват измерений турбулентности потока. Поэтому испытания в аэродинамической трубе являются также важным инструментом подтверждения достоверности результатов, полученных в процессе ВАГД-моделирования. Кроме того, результаты исследований неустойчивых явлений потока будут, очевидно, более достоверными при испытаниях в аэродинамической трубе по сравнению с применением ВАГД-моделирования.

В целях оптимизации деталей боба была построена модульная модель в уменьшенном масштабе 1:3. Она была изготовлена из пенополиуретана, позволяющего вносить изменения в форму деталей. При ее создании использовались те же упрощения в представлении экипажа, как и в модели САПР на этапе предварительной разработки. Испытания данной модели в аэродинамической трубе позволили усовершенствовать ряд компонентов боба и выявить некоторые важные особенности поля обтекания.

К компонентам, оптимизированным в ходе испытаний в аэродинамической трубе, принадлежали диффузор и общая геометрия доступного пространства для разгоняющего с задней стороны боба [1]. Кроме того, испытания в аэродинамической трубе также способствовали выявлению ряда важных характеристик поля обтекания, которые связаны с потенциальной возможностью дальнейшего снижения аэродинамического сопротивления.

На рисунке 4 (а) представлена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от величины угла наклона спины разгоняющего  $\theta$ . При этом можно ясно видеть, что аэродинамическое сопротивление уменьшается с увеличением угла наклона спины. На рисунке 4 (б) соответствующий образец потока у края обтекателя показан для углов наклона спины  $\theta = 27^\circ$  и  $\theta = 55^\circ$ . Визуализация направлений потока осуществлялась с помощью системы волокон (нитей), распределенных с одной стороны обтекателя боба. Эти волокна показывали направление векторов локальных скоростей потока. Углы локальных скоростей потока определялись относительно горизонтальной пунктирной линии. Было обнаружено, что углы векторов локальных скоростей снижаются с увеличением угла наклона спины. Отсюда следует, что массовый поток над передним краем обтекателя уменьшается с увеличением угла наклона спины.

Из численного моделирования поля обтекания [1] было известно об образовании вихрей у концов крыльев с переднего края обтекателя. На основе всех этих результатов можно сделать *вывод о существовании значительного потенциала снижения аэродинамического сопротивления посредством оптимизации положения разгоняющего.*

Относительное движение между бобом и ледовой трассой соответствует подвижной границе твердого тела. Для достижения максимально возможной имитации реальных условий бобслейного спуска следовало бы использовать аэродинамическую трубу с подвижным полом. Однако у большинства аэродинамических труб подвижное полотно отсутствует. Поэтому при измерениях, выполняемых в аэродинамической трубе, присутствует систематическая погрешность. *Результаты ВАГД-моделирования позволяют предположить, что отсутствие подвижного полотна не оказывает значительного влияния на аэродинамическое сопротивление.*

Еще один недостаток измерений в аэродинамической трубе заключается в ограниченных возможностях имитации реальных условий бобслейного спуска. В рамках настоящего исследования имитировался только спуск по одному репрезентативному изогнутому участку и одному репрезентативному прямому участку [1].

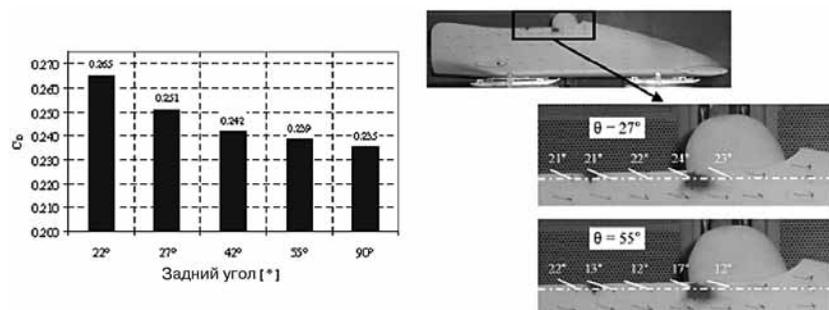


Рисунок 4: (а) влияние угла наклона спины на аэродинамическое сопротивление при  $Re_{\infty} = 6,62 \cdot 10^5$ , (б) направления потока у края обтекателя при  $Re_{\infty} = 6,62 \cdot 10^5$

Исходя из особенностей материала и процесса изготовления модели уменьшенного масштаба, нами были внесены дополнительные упрощения в ее конструкцию. Материал должен был обеспечивать возможность как можно более легкой корректировки формы боба. Учитывая возможности существующего процесса производства уменьшенных моделей, были проигнорированы некоторые детали формы. Кроме того, следовало иметь в виду принципиальную невозможность глобальных изменений формы боба, затрагивающих его основные размеры, которые регулируются соответствующими международными правилами.

При проведении каждого испытания в аэродинамической трубе определение масштаба модели является еще одной проблемой, которая должна быть решена с самого начала. Здесь требуется пойти на компромисс между двумя требованиями, заключающимися в том, что данная модель должна быть «как можно большей» и «настолько малой, насколько это диктуется необходимостью». Достаточно

крупный масштаб важен для обеспечения достаточной величины числа Рейнольдса и достаточного размера подлежащих оптимизации деталей формы. Для достижения оптимального баланса аэродинамических сил в трубе также требуются определенные размеры модели. С другой стороны, стоимость модели, блокировка и длина измерительной части аэродинамической трубы ограничивают размер уменьшенной модели.

Суммируя вышесказанное, отметим, что испытания в аэродинамической трубе соответствующей модели боба, изготовленной в уменьшенном масштабе, очень полезны как для оптимизации деталей формы, так и для подтверждения результатов ВАГД-моделирования, выполняемого на предварительном этапе разработки. Измерение коэффициентов аэродинамических сил обеспечивает значительную экономию времени и служит важным преимуществом испытаний в аэродинамической трубе. В сочетании с результатами цифрового моделирования результаты испытаний в аэродинамической трубе способствуют получению достоверных знаний о поле обтекания боба. Например, была выявлена важная роль вихрей треугольных крыльев, формирующихся у переднего края обтекателя, и сделан вывод о потенциальной возможности дополнительного снижения аэродинамического сопротивления. Необходимо также принимать во внимание граничные условия измерительной части аэродинамической трубы, а также масштаб и материал испытываемой модели.

### Точная регулировка и этап оценки опытного образца

Заключительный этап процесса опытно-конструкторской разработки заключается в проведении испытаний полномасштабного опытного образца как в аэродинамической трубе, так и в полевых условиях.

Преимущество полевых испытаний заключается в отсутствии необходимости применения упрощений. Однако очень сложно или даже невозможно осуществлять непосредственные измерения коэффициентов аэродинамических сил. Кроме того, условия окружающей среды во время реального спуска могут сильно затруднять применение инструментария для аэродинамических измерений.

Путем выполнения измерений невозможно разграничить различные силы, поскольку трение между полозьями и ледовой трассой также не может быть измерено напрямую. Это означает, что время заезда является единственной измеримой переменной, которая непосредственно связана с силами аэродинамического сопротивления и трения. Однако время заезда также зависит от навыков управления пилота. Поэтому аэродинамические силы полномасштабного боба могут быть определены только в аэродинамической трубе.

Вибрации боба во время спуска, а также неблагоприятные погодные условия предъявляют высокие требования к приборам для аэродинамических измерений. Первые эксплуатационные испытания выполнялись на бобе с просверленными в нескольких местах отверстиями для измерения давления. При этом эти мелкие отверстия часто забивались льдом, снегом и водой.

*Поскольку данные эксперименты не привели к получению достоверных результатов измерений, требуется проведение дополнительных испытаний в этой области.*

### **Заключение**

В данной статье изложены уроки, извлеченные нами из процесса опытно-конструкторской разработки, посвященной оптимизации формы боба с учетом действующих на него аэродинамических сил. Каждый этап разработки предусматривал применение различных приборов и методов, которые подвергались различным упрощениям и ограничениям. На этапе предварительной разработки главная задача состояла в создании формы боба, для чего потребовалось решить целый ряд проблем, связанных со значительными затратами времени. Прежде всего, ВАГД-моделирование требует моделирования турбулентности потока. Это неизбежно приводит к получению результатов, которые будут иметь отклонения по сравнению с результатами, которые отражают условия реального бобслейного спуска. С другой стороны, правильное сочетание вычислительных методов способствовало достижению эффективной оценки более 100 вариантов формы боба. При этом в целях повышения эффектив-

ности разработки применялись некоторые упрощения формы боба, которые не оказывали значимого воздействия на поле обтекания.

Оптимизация деталей выполнялась на основе испытаний в аэродинамической трубе, изготовленной в уменьшенном масштабе модели боба, форма которой могла легко изменяться по желанию разработчиков. На данном этапе был выявлен дополнительный потенциал для снижения аэродинамического сопротивления, что привело к введению итерационного цикла между ВАГД-моделированием и дальнейшими испытаниями модели уменьшенного масштаба в аэродинамической трубе.

Эксплуатационные испытания опытного образца боба выдвинули на первый план проблему выделения чисто аэродинамических эффектов среди всех остальных эффектов, определяющих результативность в бобслее. Кроме того, условия окружающей среды, такие как обледенение, предъявляли повышенные требования к приборам, применяемым для аэродинамических измерений.

*Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что на основе применения имеющихся на рынке приборов и методов могут быть с успехом реализованы проекты по улучшению аэродинамических свойств боба на стадиях предварительной разработки и оптимизации деталей.*

1. Winkler A., Pernpeintner A.: The Engineering of Sport 7, Vol.2. In Estivalet M., Brisson P. (Eds.) Improving the Performance of a Bobsleigh by Aerodynamic Optimization. Biarritz, 2-6 June. Springer-Verlag France, 2008.
2. Winkler A., Pernpeintner A.: Automation of the Aerodynamic shape optimization of a Bobsleigh using computational tools. In: Alam, F. et al. (ed.): Proceedings of the 4th Asia Pacific Congress on Sports Technology (APC-ST), Honolulu, USA, 21-23 September 2009.
3. Pernpeintner A., Winkler; A.: Potentials and challenges for the aerodynamic shape development process in sports engineering. In: Proceedings of the 4th Asia Pacific Congress on Sports Technology (APCST), Honolulu, USA, 21-23 September 2009. Hrsg.: Alam, F. et al., RMIT University, Melbourne, 2009.
4. Motallebi F., Dabnichki P. and Luck D.: Advanced bobsleigh design. Part 2: aerodynamic modifications to a two-man bobsleigh. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part L: J. Materials: Design and Applications, 2004.
5. Dabnichki P., Avital E.: Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh. Journal of Biomechanics 39, pp. 2733–2742, 2006.
6. Heckelmann I. Windkanaluntersuchungen zur Optimierung des Luftwiderstands eines Sportbobs. Term Paper, Lehrstuhl für Fluidmechanik, TU München, 2001.
7. Lewis O. Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh. Master of Science Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft, October 2006.
8. Togneri M. Computational fluid dynamic (CFD) modelling of the flow around a bobsled. Diploma Thesis, Lehrstuhl für Aerodynamik, TU München, 2006.
9. Krieger K. (2004) Do Pool Sharks Swim Faster? Science, Vol. 305, no 5684, 636-637.
10. Menter F.: Improved Two-Equation k-omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows. NASA Technical Memorandum 103975.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БОБА И ЭКИПАЖА МУЖСКОЙ ДВОЙКИ

*Aerodynamic Analysis of a Two-Man Bobsleigh*

G. Gibertini<sup>1</sup>, A. Soldati<sup>2,3</sup>, M. Campolo<sup>3</sup>, M. Andreoli<sup>3</sup>, and G. Moretti<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, Milano, Italy

<sup>2</sup> Dipartimento di Energetica e Macchine, University of Udine, Udine, Italy

<sup>3</sup> Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica, University of Udine, Udine, Italy (6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010). IFMBE Proceedings, Volume 31, Part 1, – Singapore, 2010, – pp. 228-231)

Бобслей – это один из самых быстрых зимних видов спорта, в котором исследования аэродинамических характеристик играют важную роль для повышения результативности. После начальной фазы заезда, во время которой спортсмены толкают боб, единственной движущей силой является сила тяжести, и при отсутствии ошибок рулевого, только две силы препятствуют движению боба вперед – сила аэродинамического сопротивления и сила трения полозьев по льду. Действие аэродинамических сил во время спуска оказывает значительное влияние на показываемое на финише время. Уменьшение силы аэродинамического сопротивления на 3% может привести к уменьшению результата на финише на одну десятую секунды. Долгое время оптимизация аэродинамических характеристик боба зависела от интуитивных изменений, вносимых в соответствии с индивидуальным опытом спортсменов. В настоящее время применяется подход, основанный на использовании для оптимизации конструкции боба тех же самых методов, которые применяются для улучшения аэродинамических свойств гоночных машин [1]. Несмотря на то, что международными правилами бобслея устанавливается базовая форма боба [2], постоянно делаются попытки внесения незначительных изменений в некоторые компоненты корпуса (бамперы, зазор между передним и задним обтекателем, форма носа, края листов рессоры и

кронштейнов полозьев) в целях повышения скорости и улучшения защиты экипажа [3]. Проводятся также исследования возможностей внесения другого рода изменений, например, выбора оптимальных положений экипажа [4,5] на разных стадиях бобслейного спуска.

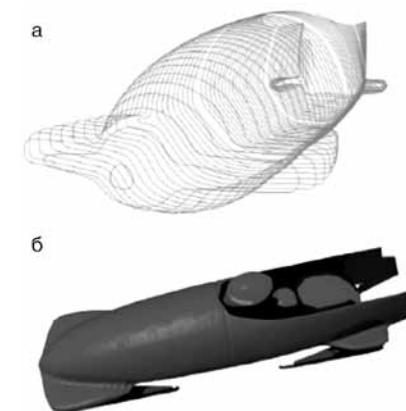
Основная трудность при оптимизации аэродинамических характеристик формы боба заключается в том, что современные соревнования по бобслею предусматривают общий зачет результатов, показанных во время нескольких скоростных спусков по ледяным трассам, два из которых проводятся на этапах мирового кубка и еще четыре – во время чемпионатов Европы и мира и на олимпийских играх. Все эти результаты складываются, и команда, показавшая лучшее общее время, становится победителем. Все бобслейные трассы отличаются индивидуальным дизайном, но имеют общие характеристики (длина около 1,5 км и перепад высот примерно 120 м). Любую трассу можно разделить на три основных участка: 1) область старта (т.е. участок разгона и занятия мест экипажем), 2) главная трасса (фаза ускорения) и 3) область торможения. По прохождении нескольких десятков метров достигается скорость более 40 км/ч. Последующая главная трасса состоит из большого количества виражей и прямых отрезков (средняя скорость: 50-110 км/ч). Максимальные скорости (140 км/ч) обычно достигаются ближе к концу трассы. Во время высокоскоростной части трассы чрезвычайно важную роль играют аэродинамические характеристики боба, а также способность рулевого удерживать боб на правильной траектории между стенками желоба. Для достижения наиболее высокой результативности оптимизация аэродинамических характеристик боба и экипажа должна основываться на реальных условиях потока: так, оптимизация, рассчитанная для движения по прямой с максимальной скоростью, не обязательно приведет к достижению оптимальных результатов на финише.

В данной статье подведены итоги работы по улучшению аэродинамических характеристик боба и экипажа мужской двойки, предназначенного для национальной команды Италии.

## Методология

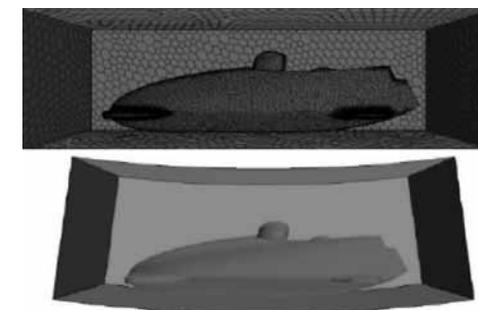
Выполняемая нами оптимизация аэродинамических характеристик была основана на уже существующей форме боба. Мы применяли методы реверсивного проектирования (обратного инжиниринга) для создания цифровой модели боба с целью осуществления ее последующей обработки с применением современных программ построения расчетных (вычислительных) сеток. Созданная на данной стадии трехмерная модель боба была дополнена моделями шлема пилота и экипажа (рис. 1).

Рисунок 1. Трехмерная модель боба: (а) результат получения изображения для реверсивного проектирования; (б) монолитная (твердотельная) модель боба и экипажа



Для характеристики аэродинамических характеристик боба в типичных условиях бобслейного спуска учитывались две различных конфигурации трассы: прямолинейный отрезок и вираж (рис. 2).

Рисунок 2. Вычислительный домен и расчетная сетка: (а) прямолинейный отрезок, (б) вираж



Для расчета движения потока вокруг боба мы использовали основанную на методе конечных объемов программу решения (солвер) уравнения Навье-Стокса – Star CD. При моделировании применялись следующие размеры прямоугольной оболочки вокруг боба: 4,2 м x 2,5 м x 1,5 м; расстояние от боба до стенки дна было равно 50 мм. Относительная скорость воздуха составляла 39 м/с (140 км/ч). Для цифрового моделирования использовались следующие граничные условия: 1) фиксированная скорость на входе (часть боба, направленная против потока), 2) произвольный срез на левой и правой стенках и на верхней стенке прямоугольной оболочки и 3) состояние на выходе (по направлению потока). Для моделирования турбулентности применялась турбулентная модель k-ε.

Первоначально была создана базовая модель боба в целях оценки сопротивления давления в разных условиях: при разных показателях скорости, разном расстоянии боба от стенки дна, на прямолинейном отрезке и вираже. Затем было выполнено два параллельных процесса моделирования с применением двух разных моделей боба, прототипами которых послужили конструкции, применяемые наиболее успешными соперниками (командами Германии и США). Основные отличия между данными моделями показаны на рисунке 3. На второй модели боба высота от стенки дна была увеличена от 50 мм до 70 мм, чтобы воспользоваться положительным влиянием на аэродинамические характеристики воздушной подушки между днищем боба и опорой [6]. В третьей конфигурации боба была изменена форма носового конуса.



Рисунок 3. Альтернативная конструкция боба: исходная форма боба (вверху) и форма боба после модификации носового конуса (внизу)

На рисунке 4 показаны изокоординаты относительной скорости воздуха, рассчитанной для исходной и модифицированной форм боба при высоте до днища 70 мм. При модифицированной конфигурации относительная скорость воздуха немного ниже и обтекаемость потока более высокая.



Рисунок 4. Изокоординаты относительной скорости и линии обтекания, рассчитанные для исходной формы боба (вверху) и модифицированной формы (внизу). В обоих случаях высота от стенки дна равна 70 мм.

На рисунке 5 можно видеть количественное сравнение силы аэродинамического сопротивления для трех исследуемых конфигураций. Ось x представляет координаты, ориентированные согласно основному направлению потока. Вторая линия показывает силу аэродинамического сопротивления, действующую на определенную часть корпуса боба в заданной координате x. Передняя часть боба имеет координату  $x = -1$ , задняя часть боба – координату  $x = 2$ . Красная линия представляет исходную форму боба и более короткое расстояние от днища; зеленая линия показывает ту же самую форму боба при большем расстоянии от днища; синяя линия – измененную форму боба

(при большем расстоянии от днища). Результаты измерений свидетельствуют о том, что изменение формы носового конуса позволило значительно снизить силу аэродинамического сопротивления, действующую вдоль корпуса боба, но в то же время еще большее снижение силы аэродинамического сопротивления было достигнуто за счет некоторого смещения назад положения экипажа при модифицированной форме боба. Увеличение высоты от опоры до днища боба также приводило к снижению силы аэродинамического сопротивления.

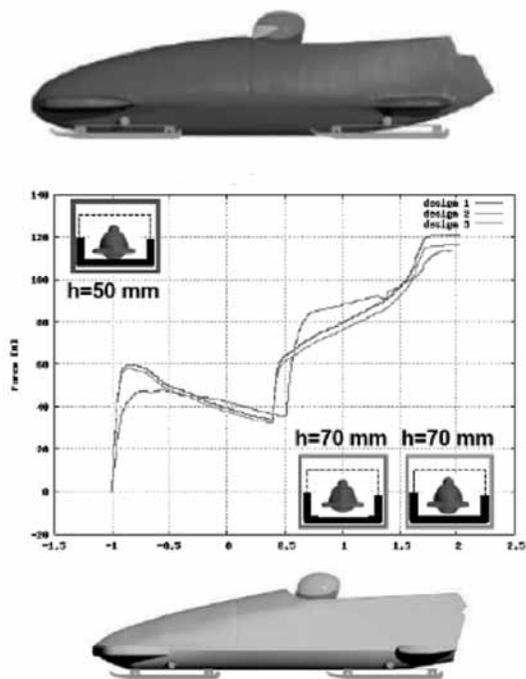


Рисунок 5. Действие силы аэродинамического сопротивления как функция координаты, определяющей обтекание потока вдоль корпуса боба, для трех исследуемых координат: (на рис. 5 расположение линий сверху вниз: красная – 1, зеленая – 2, голубая – 3), конфигурация 1 (исходная форма,  $h=50$  мм, красная линия), конфигурация 2 (исходная форма,  $h=70$  мм, зеленая линия), конфигурация 3 (модифицированная форма,  $h=70$  мм, голубая линия)

В таблице 1 обобщены данные по силе аэродинамического сопротивления. Общее снижение силы аэродинамического сопротивления в результате увеличения высоты до днища составило 5,7%; изменение в форме также оказало значимое воздействие на снижение силы аэродинамического сопротивления (-8,9% по сравнению с исходной конфигурацией), которое только отчасти может быть объяснено модификацией формы носового конуса (-2,6%). Поскольку в конструкции 3 снижение силы аэродинамического сопротивления в значительной степени зависело от положения экипажа, следует ожидать, что для этой конфигурации существует дальнейшая возможность оптимизации.

Таблица 1. Сила аэродинамического сопротивления (140 км/ч, прямолинейный отрезок трассы)

Конфигурация	Сила аэродинамического сопротивления (Н)	% вариации
Конструкция 1	122	-
Конструкция 2	115	-5,7
Конструкция 3	112	-8,9

На рисунке 6 (слева) показана конечная форма боба после проведения испытаний и исправления ошибок конструкции.

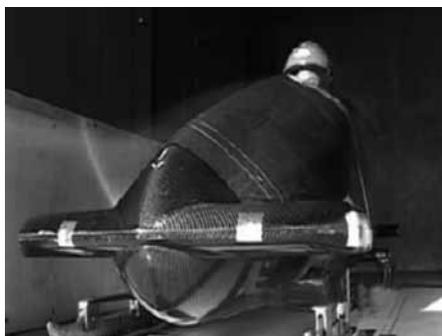


Рисунок 6. Конечная форма боба (слева) и модель, выполненная в уменьшенном масштабе 1:8 (справа)

Геометрия этой конечной формы была использована для создания модели боба в уменьшенном масштабе (1:8) (рис. 6, справа) с применением методов ускоренного изготовления прототипов и для производства полномасштабной модели боба.

Выполненная в уменьшенном масштабе и полномасштабная модели боба прошли испытания в аэродинамической трубе Политехнического института г. Милана.

На рисунке 7 представлен снимок, сделанный во время проведения испытаний. Дымчато-серый цвет применялся для визуализации линий обтекания на поверхности корпуса боба, с основным акцентом на наиболее важных областях (бамперах, носовом конусе, хвостовой части, положении экипажа).



*Рисунок 7. Конфигурация боба с оптимизированными аэродинамическими характеристиками во время испытаний в аэродинамической трубе*

В ходе данных испытаний сила аэродинамического сопротивления составляла 137 Н, что продемонстрировало хорошую корреляцию с результатом, рассчитанным при ВАГД-моделировании, которое выполнялось при отсутствии полозьев.

На заключительной стадии боб с окончательной конфигурацией, предназначенной для участия в соревнованиях, испытывался в условиях бобслейной трассы. При этом была зарегистрирована третья по величине скорость для испытываемого боба.

1. Katz, J (2006) Aerodynamics of race cars. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 38: 27-63.
2. FIBT, International Rules. Italy: FIBT, 2005.
3. Dabnichki, P; Motallebi, F; Avital, E (2004) Advanced bobsleigh design. Part 1: body protection, injury prevention and performance improvement. *Proc.Inst. Mech. Eng. Part L* 218: 139-144.
4. Motallebi, F; Dabnichki, P; Luck, D (2004) Advanced bobsleigh design. Part 2: aerodynamic modifications to a two-man bobsleigh. *Proc.Inst. Mech. Eng. Part L* 218: 139-144.
5. Dabnichki, P; Avital, E (2006) Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh. *J. Biomech.* 39: 2733-2742.
6. Zhang, X; Toet, W; Zerihan, J (2006) Ground effect aerodynamics of race cars. *Applied Mech. Rev.* 59: 33-49.

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХМЕСТНОГО БОБА

*Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh Peter Dabnichki, Eldad Avital Sport Engineering Research Group, Department of Engineering, University of London, Queen Mary, Mile End Road, London E1 4NS, UK (Journal of Biomechanics, – 2006, – № 39, – pp. 2733–2742)*

Бобслей является одним из самых скоростных и самых захватывающих зимних видов спорта, победа в котором часто достигается благодаря преимуществу в несколько сотых долей секунды. Все современные санно-бобслейные трассы оснащены холодильным оборудованием для поддержания контролируемой температуры льда независимо от погодных условий. Единственная трасса с естественным покрытием, на которой проводятся соревнования на кубок мира, расположена в Сен-Моритце. Она реконструируется каждый год. Трассы имеют самую разную конфигурацию, поскольку при их проектировании необходимо до определенной степени учитывать естественную конфигурацию природных склонов. Однако согласно международным правилам санно-бобслейные трассы должны иметь ряд общих характеристик, например, длину около 1,5 км и общий вертикальный перепад высот примерно 120 м. Во время бобслейного спуска средний уклон трассы должен составлять приблизительно 8,6%, а максимальный уклон не должен превышать 15% (Международная федерация бобслея и тобогана (ФИБТ), 2002).

### Заезд в бобслее

Стандартный заезд в бобслее подразделяется на три основных этапа: стартовый разгон, управляемый спуск и финиш. Члены экипажа

из стартового положения стоя начинают разгон боба, после чего они запрыгивают в сани, выполняя посадку. Ограничения в длине стартового участка разгона отсутствуют, он может достигать до 50 м от линии старта, в зависимости от уклона каждой конкретной трассы. Измерение времени начинается с «летучего старта» — часы приводятся в действие фотоэлементом на расстоянии примерно 15 м от стартовой линии. Эта начальная часть заезда играет решающую роль в определении общего места экипажа на финише при условии следования пилотом по оптимальной траектории. Очень широко распространенная точка зрения заключается в том, что сокращение времени стартового разгона на 0,01 с. примерно соответствует снижению общего времени заезда на 0,03 с. После посадки результат полностью зависит от квалификации пилота и главным образом от технических характеристик саней. Во время типичного бобслейного спуска скорость может достигать 135 км/ч, а сила тяжести до 5 G (ФИБТ, 2002).

Медали в соревнованиях по бобслею на последних олимпийских играх в Солт-Лейк-Сити были выиграны только за счет долей секунды, что служит подтверждением долгосрочной тенденции, кульминацией которой послужил тот факт, что олимпийская бронзовая медаль в Нагано была разделена между командами из Великобритании и Франции. Это означает, что они показывали время, разница в котором не превышала 0,01 с., в течение четырех заездов и на дистанции трассы более 6 км. Столь незначительные различия в результатах (0,01 с. составляет 0,04% общего времени) побуждают команды искать технологические решения по оптимизации конструкции боба в целях достижения конкурентного преимущества над соперниками.

### Технические правила и нормативы

Бобслейные сани имеют четыре полоза (одна пара передних и пара задних полозьев — рис. 1 и 2). Существует два типа боба — двух- и четырехместный боб, поскольку женщины соревнуются в формате двухместного боба. Дозволенный минимальный вес равен 170 кг для двухместного и 210 кг для четырехместного боба. Максимальный вес (включая экипаж) двухместного и четырехместного боба составляет 390 и 630 кг, соответственно, максимальный предел для веса женс-

кого боба был установлен в 350 кг. Максимальный вес может достигаться посредством балласта, закрепляемого на санях. Общая длина саней не имеет ограничений. Однако существуют ограничения размеров различных частей боба, например, бамперов и обтекателя, а также минимального расстояния между осями. В соответствии с рекомендациями по оптимизации конструкции саней типичная длина двухместного боба должна быть выдержана в пределах от 3 до 3,2 м. Для типичного бобслейного заезда рекомендуется, чтобы среднее число Рейнольдса было равно  $1,4 \times 10^6$ /м длины, а число Маха —  $< 0,1$ . В состав саней входят рулевой механизм и система подвески, которые подвергаются очень строгому регулированию. Однако наиболее суровые меры контроля применяются по отношению к форме боба, то есть к его аэродинамическим характеристикам.

### Ограничения конструкции боба, связанные с аэродинамическими характеристиками

Ниже перечислены наиболее важные конструктивные ограничения, установленные ФИБТ (2002). К ним относятся минимальные и максимальные размеры боба в целом, а также ограничения размеров его деталей, например, расстояния от центра передней оси до переднего конца саней или расстояния от неподвижной поверхности кронштейнов полозьев до центра оси.

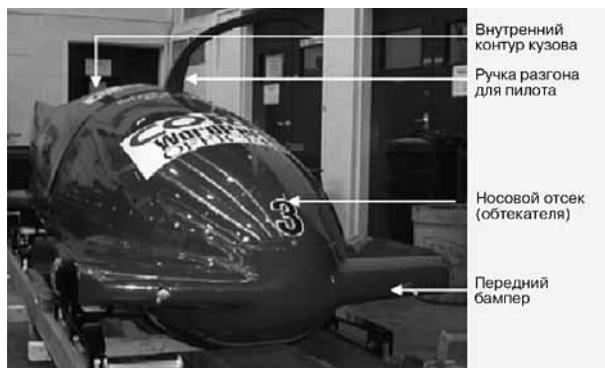


Рисунок 1. Двухместный боб с ручкой разгона для пилота в стартовом положении (вид спереди)

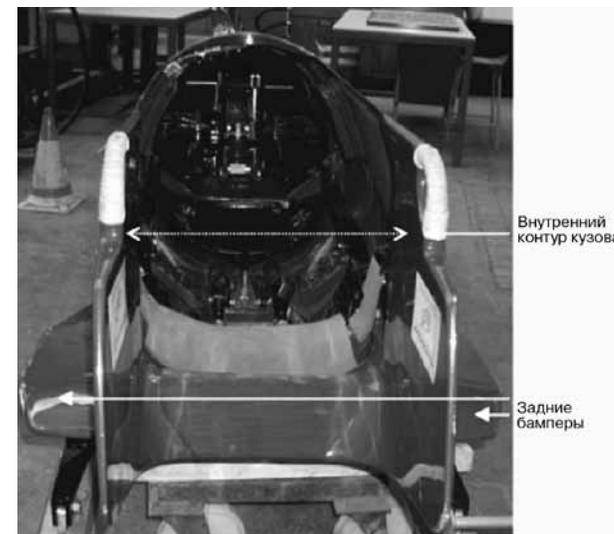


Рисунок 2. Двухместный боб (вид сзади)

Большое значение для аэродинамических характеристик боба имеют ширина (внутренняя и наружная) и высота обтекателя (рис. 1 и 2). Запрещается также использовать какой-либо другой дополнительный материал при изготовлении профиля обтекателя (ФИБТ 2002). Детальные ограничения были также установлены для боковых областей обтекателя, которые препятствуют их оптимизации. Наиболее важными с точки зрения аэродинамики являются ограничения формы обтекателя, которая должна быть выпуклой за небольшими исключениями в отношении бамперов (переднего и заднего), углубления для тормоза и т.п.

Правилами ФИБТ запрещено вносить любого рода нетрадиционные изменения в форму боба, которые могут выступать в роли турбулизаторов потока, или добавлять отверстия, повышающие аэродинамический эффект. На основании строгих ограничений в отношении формы и расположения деталей бобслейных саней можно сделать вывод, что они направлены на то, чтобы воспрепятствовать национальным командам в достижении значительного преимущества над соперниками благодаря сокращению аэродинамического сопротивления.

Таким образом, правила и нормативы в области бобслея были разработаны в силу двух основных причин:

- 1) Ограничение влияния конструктивных особенностей саней на результаты соревнований.
- 2) Повышение характеристик безопасности боба.

Последняя причина представляет собой неотразимый довод, поскольку ни один исследователь или разработчик не захочет поставить под угрозу жизнь и здоровье спортсменов (Dabnichki, 1998). Однако это противоречило бы самой идее спорта, если бы команды не пытались добиться конкурентного преимущества над своими противниками, естественно, без нарушений действующих правил и нормативов. Dabnichki et al. (2002, 2004a) указали на возможность улучшения аэродинамических характеристик саней при одновременном повышении уровня безопасности. Более того, Dabnichki (2004) продемонстрировал, что улучшение аэродинамических свойств может быть достигнуто благодаря модификациям одних только внутренних частей боба. Это особенно важно для женских экипажей, которые вынуждены пользоваться санями, созданными с учетом антропометрических характеристик мужчин. Подобные усовершенствования не противоречат существующим правилам, а скорее, наоборот, полностью соответствуют их целям, поскольку ставят во главу угла безопасность спортсменов. Было также доказано, что благодаря комбинации численного моделирования — вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД) и экспериментальных испытаний также могут быть достигнуты удовлетворительные результаты в области оптимизации аэродинамических характеристик бобслейных саней.

### **Вычислительная аэрогидродинамика (ВАГД) и ее применение для научных исследований в области спорта**

Первоначально ВАГД последовательно использовалась в технических видах спорта, таких как автоспорт, парусный спорт и мотоспорт, которые предъявляют высокие требования к эффективности применяемых в них транспортных средств (Hannah, 2002). В последнее время она начинает приобретать все большую популярность при проведении научных исследований в области спортивной биомеха-

ники (Bixler and Riewald, 2002) и спортивной инженерии (Dabnichki et al., 2002). Одна из причин сравнительно медленного внедрения этого метода заключается в чрезвычайной сложности проблем — неустановившиеся потоки, высокий уровень турбулентности, сложные формы исследуемых твердых тел. Это в свою очередь требует применения очень мощного вычислительного аппаратного и программного обеспечения. Такие компьютерные программы, как Fluents (Fluent Ltd.), успешно применялись для ВАГД-моделирования при разработках формулы 1 (Hannah, 2002), в области плавания (Bixler and Riewald, 2002) и даже для гонок на инвалидных колясках (Hannah, 2002). Однако аэродинамические свойства боба и в особенности наличие открытого кузова с находящимся внутри него экипажем ставит перед разработчиками средств ВАГД-моделирования новые проблемы, связанные с модификацией существующих моделей вычислительных операций и устройств для ввода экспериментальных данных.

### **Научные исследования в области бобслея**

До недавнего времени количество посвященных бобслею научных публикаций было довольно ограниченным. Bruggemann et al. (1997) анализировали влияние ряда факторов, связанных с условиями окружающей среды, применяемыми материалами/оборудованием и характеристиками членов экипажа на результативность в бобслее и санном спорте. В фокусе внимания данных исследований находился сравнительный анализ влияния оборудования и спортсменов на общую результативность при сопоставлении результатов соревнований по санному спорту и бобслею в двухместных и четырехместных санях на зимних олимпийских играх 1994 года. *При этом была выявлена значимая корреляция между временем стартового разгона и общим ускорением на исследуемом прямом участке трассы и показываемым на финише результатом.* Был сделан вывод, что для наиболее сильных команд в бобслее и скелетоне *основными предпосылками достигаемой ими высокой результативности служат быстрое время и высокая скорость в конце участка стартового разгона.*

*Навыки вождения* на наиболее сложных участках трассы имели более высокую статистическую значимость для 15 сильнейших экипажей

мира, особенно в санном спорте. *Влияние полозьев* на результативность не было выявлено в соревнованиях по бобслею и санному спорту.

Leonardi et al. (1985) исследовали влияние фазы разгона на результативность в бобслее. В данном исследовании не изучалось воздействие на результативность конструкции саней, оно было полностью посвящено определению эффективности выполняемого спортсменами стартового разгона.

Hubbard et al. (1989) создали сложную трехмерную модель динамики выполнения поворотов в бобслее. Они разработали на ее основе тренажер по управлению бобом для американской команды по бобслею, члены которой используют его до сих пор.

Hokkirigawa (1998) исследовал трибологию полозьев боба и разработал полозья для бобслейных саней, примененных японской командой во время олимпийских игр в Нагано. Он, также, продолжал работать над соответствующими разработками для скелетона и бобслея во время подготовки к олимпиаде в Солт-Лейк-Сити (Hokkirigawa, 2002).

Rebsch et al. (1991) изучали взаимодействие между стальными полозьями саней и льдом и обнаружили, что оно зависит от температуры и погодных условий, а также от материала, из которого изготовлены полозья. Авторы провели анализ фрикционного взаимодействия, и представили рекомендации по улучшению материалов в целях обеспечения наиболее эффективного скольжения для широкого диапазона температур при соблюдении всех существующих международных правил.

Балакин и Переверзева (1991) представили обзор экспериментальных и теоретических публикаций, посвященных трению о лед и снег, которые могли быть использованы при конструировании коньков, лыж, саней, санно-бобслейных трасс и т.п. В рамках данного обзора был выполнен теоретический анализ взаимодействия между санями и льдом.

До настоящего времени было опубликовано мало работ, посвященных аэродинамическим характеристикам саней, а публикации по влиянию членов экипажа на аэродинамические свойства боба вообще отсутствуют. Только в последнее время появились публикации в области аэродинамики и эргономики. В них было указано на возможность значительного улучшения как аэродинамических, так и эргономических характеристик саней (Dabnichki, 2004; Dabnichki et al., 2004b).

Важным результатом, полученным в ходе данных исследований, было значительное сокращение аэродинамического сопротивления благодаря улучшению эргономических свойств. Однако в пределах всего исследуемого диапазона скоростей не были достигнуты по-настоящему эффективные аэродинамические характеристики. *Вероятная причина данного результата заключается в том, что при проведении этих исследований не учитывалось влияние экипажа и конфигурация внутреннего контура кузова боба.*

**Целью настоящего исследования** является определение степени влияния членов экипажа, особенно в женском бобслее, на аэродинамические свойства боба.

*Логическое обоснование необходимости проведения данного исследования состоит в том, что женские экипажи используют сани, построенные для мужчин* (Dabnichki et al., 2004b), и потому между членами экипажа и боковыми стенками существует большой просвет. С применением вычислительных и экспериментальных методов были выявлены и исследованы два основных фактора: 1) положение тела разгоняющей спортсменки, характеризующееся наклоном верхней части тела, и 2) расстояние между внутренним контуром кузова саней и спортсменкой.

## Методы

### **Модель вычислений: аэродинамика внутреннего контура кузова саней**

### **Модель внутреннего контура кузова**

Полномасштабная модель внутреннего контура кузова, применяемая в данном исследовании, показана на рис. 3. Полость кузова имеет закругленный передний край, поскольку ее ширина суживается по линейному закону на 14 см, сильно напоминая общую конфигурацию саней олимпийской команды Великобритании, которая полностью соответствует нормативам ФИБТ (2002).

В целях моделирования внутренней контур кузова был искусственно расширен примерно на 0,5 м (постоянная ширина), чтобы позволить потоку установиться и тем самым снизить возможные цифро-

вые эффекты, возникающие под действием выходного потока. Вход потока был установлен на таком же расстоянии от переднего края внутреннего контура, как и расстояние от конца боба до внутреннего контура кузова. Поле скоростей было нормализовано с применением скорости набегающего невозмущенного потока на входе. Число Рейнольдса было установлено до  $2 \times 10^6$ /м, что соответствует максимальной скорости боба примерно на уровне 34 м/с.

### Модель экипажа

Аэродинамический анализ выполнялся в целях исследования влияния положения спортсменов относительно друг друга и внутреннего контура (полости) кузова саней. Следует отметить, что положение пилота обуславливается размерами внутреннего контура, обзором трассы и максимальной устойчивостью тела. Пилот управляет санями, стараясь выбрать оптимальную траекторию движения. При этом требования, предъявляемые к эффективности управления бобом, имеют приоритет над аэродинамическими характеристиками и определяют сидячее положение пилота. Между тем разгоняющая не играет активной роли во время заезда, и важно, чтобы принимаемая ею поза способствовала минимизации аэродинамического сопротивления и динамических возмущений.

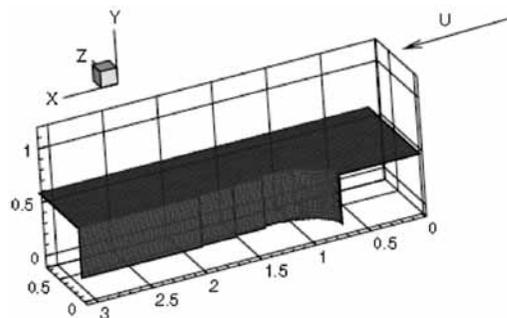


Рисунок 3. Изометрическое изображение полноразмерной модели внутреннего контура кузова саней (модель соответствует существующему внутреннему контуру кузова саней, при умеренном сужении его ширины до  $1,3 \text{ м} < x < 2,5 \text{ м}$ )

В связи с этим в центре внимания при проведении настоящего исследования находилось положение разгоняющей, поскольку во время заезда после фазы разгона ей принадлежит пассивная роль, и потому она легко может принять оптимальную с точки зрения аэродинамики позу. Параметры, представляющие особый интерес, включали угол наклона тела в сторону пилота и просвет между спортсменками и внутренними стенками кузова. Для имитации внутренних накладок, часто применяемых женскими экипажами (Dabnichki, 2004; Dabnichki et al., 2002, 2004a), с каждой стороны полости кузова была добавлена дополнительная планка. Планка была помещена в место с координатами  $0,3 < y < 0,46 \text{ м}$  и  $|z| > 0,2 \text{ м}$ , создавая в этой области более узкий внутренний контур кузова.

Как упоминалось выше, описание подобных исследований отсутствуют в опубликованных до сих пор материалах, и потому в качестве первого этапа очень сложного численного моделирования в рамках данного исследования выполнялся анализ только внутренней аэродинамики полости кузова. Таким образом, на данном этапе не рассматривалась внешняя форма боба, что означает, что края внутреннего контура присоединялись к твердой плоскости, как показано на рис. 3. Моделирование частей тела спортсменов выполнялось с применением основных аналитических форм псевдоцилиндров и эллипсоидов, в то время как геометрические параметры шлемов как пилота, так и разгоняющей соответствовали реальной геометрии шлемов, применяемых во время соревнований. Размеры всех моделируемых фрагментов были выполнены в масштабах, отражающих измеренные ранее антропометрические характеристики спортсменов мирового уровня.

### Координатная сетка

В настоящем исследовании рассматривалось только доминирующее сопротивление давления, и поэтому для упрощения расчетов при моделировании полости кузова и экипажа использовалась структурированная декартова координатная сетка, как это уже было продемонстрировано Motallebi et al. (2002). При этом границы твердых тел совпадали с линиями координатной сетки. Хотя можно было

предположить, что подобный несколько грубый подход к моделированию может отрицательно сказаться на точности расчетов потока, исследования по усовершенствованию сетки показали, что размер сетки не оказывал влияния ни на прогнозируемое поведение потока, ни на качество выводов, делаемых на его основе. Поэтому на данном этапе не выполнялось более точное моделирование с применением прямоугольных ячеек конечного объема. Это моделирование предполагается использовать для анализа полномасштабной модели, которая будет включать точную геометрическую модель внешней формы боба. Кроме того, было сделано допущение, что тело пилота полностью блокирует область углубления для ног в полу кузова, что практически так и происходит в реальных условиях. Это означает, что любое воздействие резонансного движения, которое может наблюдаться в данной области, не учитывается в настоящем исследовании. *Однако это движение в значительной степени зависит от объема и положения ног пилота, и потому оно должно послужить объектом исследований в будущем.*

### **Модель потока**

Моделирование потока выполнялось без учета сжимаемости, но принимая во внимание его вязкость и турбулентность. Для выполнения этой задачи применялась внутрифирменная программа Lithium. Данное программное обеспечение уже использовалось ранее для имитации потока вокруг выполненной в уменьшенном масштабе модели боба (Motallebi et al., 2002) и простого прямоугольного внутреннего контура кузова (Dabnichki et al., 2002). В настоящем исследовании применялось моделирование полномасштабного внутреннего контура кузова, поэтому мы использовали метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) в связи с высоким числом Рейнольдса. Турбулентность моделировалась с применением модели  $k-\omega$  с высоким числом Рейнольдса (Wilcox, 1998; Mentor, 1991). Последняя обычно применяется в расчетах аэродинамических характеристик, так как позволяет осуществлять эффективное прогнозирование поведения потока при положительном градиенте давления. Тем не менее, следует отметить, что в последнее время появились новые модели, которые, например, позволяют избежать приближения

Буссинеска, применяемого в модели  $k-\omega$ , путем непосредственного моделирования напряжений Рейнольдса и тем самым повысить точность расчетов, особенно при прогнозировании отрыва потока.

Для усиления неразрывности потока был использован метод проекции градиента, поскольку в условиях конвекции применялась схема противветровой дифференциации второго порядка, а в условиях диффузии — центральная схема второго порядка. Со временем уравнения были расширены с применением схемы Рунге-Кутты третьего порядка до достижения установившегося состояния. При этом не учитывались условия для поля скоростей, возникающие при проскальзывании потока относительно стенки, и для  $k$  и не применялись стеночные функции (Wilcox, 1998).

Было сделано допущение о существовании в средней плоскости внутреннего контура кузова реальных условий симметрии. Это может привести к подавлению бокового бафтинга по типу фон Кармана, но последний более характерен для аэродинамики наружной поверхности боба. В систему уравнений было также введено пассивное скалярное поле в целях контроля разрешения при моделировании и для иллюстрации потока (Avital et al., 2000).

### **Экспериментальное тестирование Экспериментальная установка**

Предварительные испытания полномасштабного боба проводились в аэродинамической трубе компании BAE Systems в Вортоне (Worton). Все испытания в рамках описываемого здесь протокола исследований выполнялись в аэрокосмической лаборатории Технологического факультета Университета имени королевы Марии в Лондоне.

Аэродинамическая труба имеет замкнутое сечение с уровнем турбулентности  $< 0,4\%$ . Степень сужения равна 5,6:1 и соответствующие размеры измерительной части аэродинамической трубы составляют: длина — 2,3 м, ширина — 1 м, высота — 0,77 м.

Для выполнения измерений подъемной силы и силы аэродинамического сопротивления применялись шестикомпонентные аэродинамические весы. Статическая погрешность весов была равна 0,01 Н, а линейность выходного напряжения —  $> 0,996$ . Аэродинамическое

сопротивление и подъемная сила измерялись для 10 000 замеров, и если стандартное отклонение превышало 0,05 средней величины, результаты признавались недействительными и проводились соответствующие корректировки. Для контроля гистерезиса выполнялись произвольные статические проверки, охватывающие 20 000 замеров.

Максимальная скорость при проведении испытаний составляла 40 м/с. Результаты экспериментов не подвергались корректировке, поскольку реальная блокировка потока, возникающая благодаря форме бобслейных трасс, является более высокой по сравнению с блокировкой в аэродинамической трубе. Число Маха было таким же, как в реальных условиях, в то время как число Рейнольдса составляло 0,3 его фактической величины.

Эксперименты проводились с применением модели боба выполненной в масштабе 1:4. Экспериментальная установка показана на рис. 4.

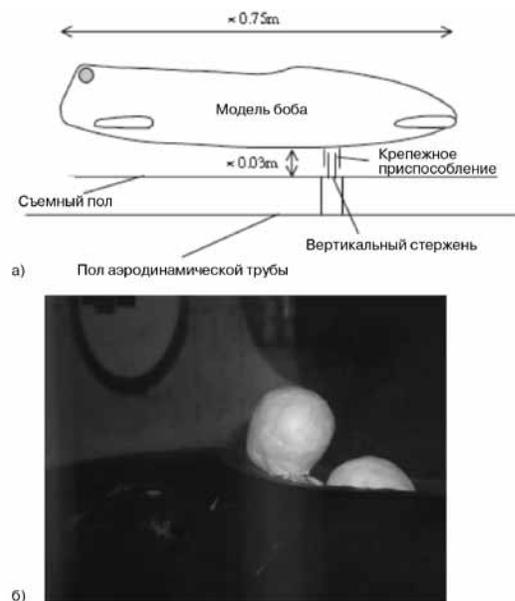


Рисунок 4. Экспериментальная установка: (а) вид сбоку экспериментальной установки в аэродинамической трубе, (б) испытания в аэродинамической трубе с имитацией экипажа и внутренними модификациями

Модели участниц олимпийских игр, выполненные в том же масштабе, были помещены внутрь саней, отражая идентичную конфигурацию членов экипажа во время заезда. Испытания проводились при максимальной скорости потока 34 м/с. Для измерений подъемной силы и аэродинамического сопротивления применялись шестикомпонентные аэродинамические весы.

### **Влияние положения разгоняющей на общее аэродинамическое сопротивление**

Испытания с применением моделей спортсменок проводились в целях исследования влияния изменения их сидячих положений на аэродинамическое сопротивление модели. В силу причин, которые уже были изложены выше, сидячее положение пилота было фиксированным, и между головой пилота и кромкой кузова был оставлен небольшой просвет. Угол в сидячем положении разгоняющей, т.е. наклон верхней части тела по отношению к горизонтальной плоскости, изменялся в ходе исследований. На основе вычислительного анализа были отобраны углы размером 45°, 55° и 65°. Измерения аэродинамического сопротивления выполнялись для каждого угла и расстояния отрыва потока во всем диапазоне скоростей от 5 до 34 м/с. Последующие испытания были посвящены исследованию сидячих поз разгоняющей на расстоянии 215, 228 и 253 мм от пилота.

### **Влияние формы тела разгоняющей на общее аэродинамическое сопротивление**

В целях оценки чувствительности к внутренним изменениям тест был повторен с измененными формами шлема и формы тела разгоняющей (было выполнено моделирование горба для имитации положения тела, принимаемого некоторыми спортсменками). Предполагалось, что подобная модификация позы и шлема позволит придать обтекаемую форму телу разгоняющей и обеспечит непрерывный плавный переход между туловищем и шлемом. Тест выполнялся при нахождении разгоняющей на расстоянии 215 мм от пилота согласно результатам описанных выше экспериментов по изучению различных сидячих положений разгоняющей.

### **Влияние просвета между спортсменками и стенкой внутреннего контура кузова на общее аэродинамическое сопротивление**

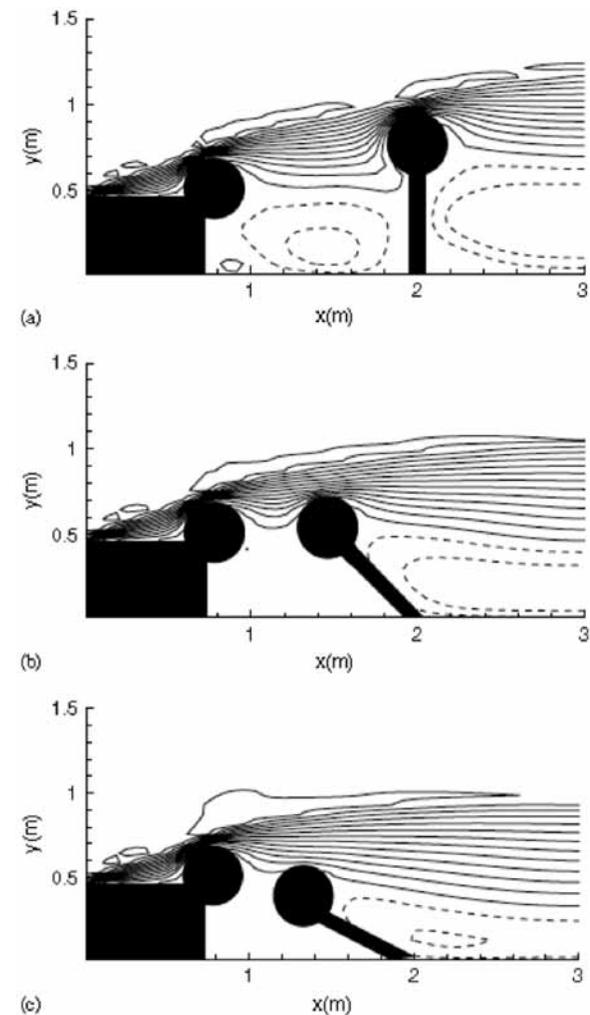
Испытания проводились с применением копии боба в масштабе 1:4 (с моделями спортсменов внутри и накладками для сокращения просвета).

**Цель данных испытаний состояла** в определении структуры потока вокруг боба, выполненного в масштабе 1:4, и внутреннего контура кузова посредством визуализации потока и измерения аэродинамического сопротивления и подъемной силы для подтверждения достоверности результатов вычислений.

#### **Результаты и анализ**

##### **Компьютерное моделирование положения тела спортсменок**

На рис. 5 показаны контуры осевой скорости в средней плоскости внутри кузова для трех разных положений верхней части тела разгоняющей. Тело пилота находится полностью внутри кузова, над поверхностью которого выступает только ее шлем. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что наклон вперед разгоняющей ограничивает обратный поток между спортсменками, который практически исчезает при угле сгибания ее верхней части тела более  $45^\circ$ . Обратный поток позади разгоняющей сохраняется, но его высота уменьшается с увеличением наклона вперед благодаря лучшему прилипанию потока. Данный результат был подтвержден с помощью результатов вычислений с введением пассивного скалярного поля. На рисунке 5 изображены контуры кинетической энергии турбулентности для корпусов, показанных на рис. 3. Очевидно, влияние разводящей на поток впереди пилота является незначительным. Однако когда верхняя часть тела разгоняющей принимает более четко выраженное положение супинации, ее шлем превращается в один из основных факторов, генерирующих турбулентность подобно шлему пилота.



*Рисунок 5. Контурные графики осевой скорости в средней плоскости, изображенного на рис.3 внутреннего контура кузова боба с 15 контурными уровнями от 0,15 до 1,05. Сплошные линии представляют положительные, а пунктирные – отрицательные величины*

(а) Разгоняющая сидит прямо, (б) Разгоняющая наклоняется вперед под углом  $45^\circ$ , (с) Разгоняющая наклоняется вперед под углом  $60^\circ$

Оба шлема вызывают повышение энергетического уровня, которое почти в шесть раз превышает величину максимального потока на входе. С увеличением угла наклона вперед турбулентность уменьшается, и при  $60^\circ$  шлем разгоняющей оказывается за пределами спутного следа шлема пилота.

Было обнаружено, что при наклоне разгоняющей вперед на  $45^\circ$  общее сопротивление давления (сопротивление движению) снижается в 20 раз. Дальнейший наклон вперед на  $60^\circ$  приводит к дальнейшему снижению сопротивления давления, при этом даже возникает незначительная направленная вперед сила («положительное аэродинамическое сопротивление»). Это означает, что модель разгоняющей подвергается воздействию направленной вперед силы, порождаемой циркуляцией воздуха, которая вызывается положением ее тела. Следует отметить, что величина этой силы очень незначительна, но ею не следует пренебрегать в виду важности всех факторов в той или иной степени влияющих на результат.

### **Результаты исследований по изменению положения тела спортсменов**

Визуализация потока (рис. 8) продемонстрировала очень хорошее согласование с результатами вычислительного моделирования структуры потока, что доказывает тот факт, что вторичная циркуляция между спортсменками исчезает, когда разгоняющая достаточно сильно наклоняется вперед.

Тенденции, выявленные в результате измерений аэродинамического сопротивления и подъемной силы как функции наклона тела разгоняющей, подтвердили соответствие выбранной модели вычислительных операций.

Однако основанное на расчетах прогнозирование монотонно убывающей величины аэродинамического сопротивления оказалось неожиданным, поскольку результаты предшествующих экспериментов (Motallebi et al., 2002) позволили предположить, что наименьшее аэродинамическое сопротивление возникает при угле наклона  $45^\circ$ , а дальнейший наклон тела приводит к его незначительному увеличению. Повторные эксперименты показали, что более близкое распо-

ложение разгоняющей приводит к снижению аэродинамического сопротивления (рис. 9). Кроме того, была проведена серия испытаний по моделированию фактического сгибания позвоночника и опускания головы к груди, на основании которых позднее было внесено незначительное изменение в конструкцию шлема. На рисунке 9 можно видеть значительное улучшение коэффициента аэродинамического сопротивления разгоняющей с наклоном туловища вперед под углом  $58^\circ$  благодаря изменению положения тела и головы. Предполагается, что причиной этого служит замедление отрыва потока от шлема разгоняющей. При низких числах Рейнольдса снижение коэффициента аэродинамического сопротивления составляло примерно 15%, при более высоких числах Рейнольдса этот показатель уменьшался до 8%.

Сочетание наиболее рациональной позы в положении сидя и угла наклона туловища разгоняющей с учетом фактической формы тела позволяет снизить общее аэродинамическое сопротивление приблизительно на 12% в условиях постоянной средней скорости движения по трассе.

В действительности некоторые из данных результатов исследований уже широко используются бобслейными экипажами, большинство из которых принимают аналогичные положения. Однако необходимо более тщательное изучение расположения мест членов экипажа, формы шлема и угла наклона туловища как важных факторов достижения конкурентного преимущества.

Изложенные выше данные позволяют предположить соответствие применяемого вычислительного метода поставленным целям и получение на его основе надежных результатов экспериментов.

### **Компьютерное моделирование просвета между внутренними стенками кузова и разгоняющей**

Для анализа влияния просвета между внутренними стенками кузова и разгоняющей проводилось компьютерное моделирование для более широкого внутреннего контура кузова боба. Моделирование более широкого внутреннего контура выполнялось при постоянной величине его ширины после округлого переднего края, как это показано на рис. 6(b). Было обнаружено, что более широкий внутренний

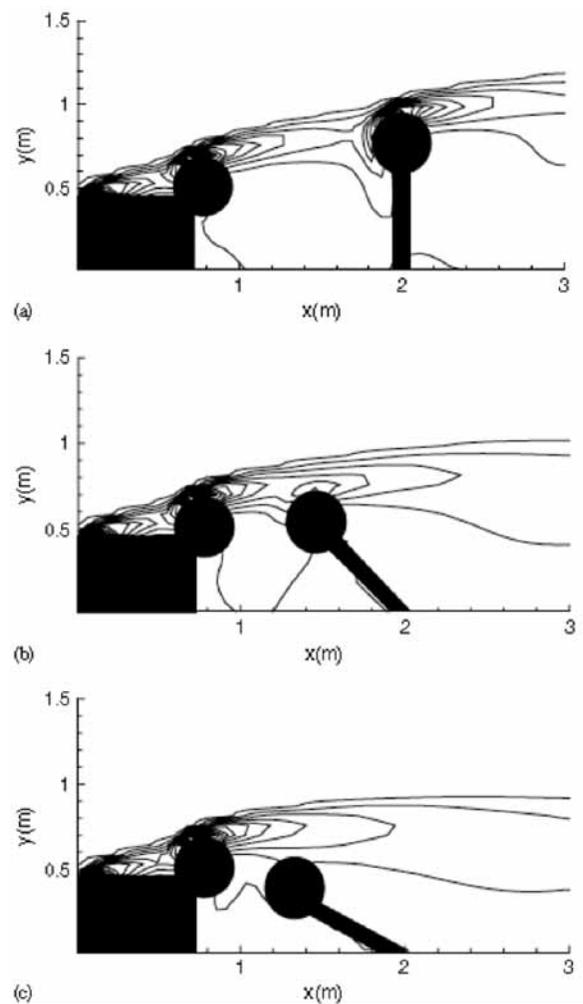


Рисунок 6. Контурные графики кинетической энергии турбулентности, соответствующие полям скорости, показанным на рис. 5.

Всего наблюдается 15 контурных линий, проходящих на уровне от 0,003 до 0,3 м при равных интервалах. Разгоняющая: (а) сидит прямо, (б) наклоняется вперед под углом  $45^\circ$ , (с) наклоняется вперед под углом  $60^\circ$

контур кузова способствовал увеличению сопротивления давления (сопротивления движению), которое варьировало от, примерно, 10% при прямой посадке разгоняющей до более чем в два раза, при наклоне вперед на  $45^\circ$ . На рисунке 6 показаны скорость и кинетическая энергия турбулентности полей вторичного потока через среднюю плоскость. Векторы скорости имеют сходную конфигурацию для обоих контуров обратного потока, ударяющего в спину разгоняющей, обтекая ее через просвет с боковой стенкой кузова и проникая в пространство между двумя спортсменками. Однако при более узком внутреннем контуре кузова вблизи спортсменов наблюдаются более низкие уровни турбулентности, хотя в пространстве между ними также можно видеть область более высокой турбулентной активности. Последняя возникает в связи с кривизной боковой стенки и вызывает положительный градиент давления.

На рисунке 7 показана результирующая кинетическая энергия турбулентности для широкого внутреннего контура кузова в центре его средней плоскости, которая определялась в целях выявления того, не связано ли снижение турбулентной активности с уменьшением сопротивления давления. Уровни контурных линий выбирались специально для фокусировки внимания на вторичном потоке внутри кузова. Очевидно, что добавка планок для сужения внутреннего контура приводила к снижению уровня турбулентности, особенно в пространстве между пилотом и разгоняющей. Было также зарегистрировано снижение сопротивления давления примерно на 75%, что составляет половину его величины для узкого внутреннего контура кузова без планок. С другой стороны, при прямой посадке разгоняющей турбулентная активность впереди и сзади нее усиливается благодаря планкам, при этом сопротивление давления также увеличивается на несколько процентов. На основании этого можно сделать вывод, что сокращение турбулентной активности вторичного потока должно приводить к снижению сопротивления давления (рис. 8 и 9).

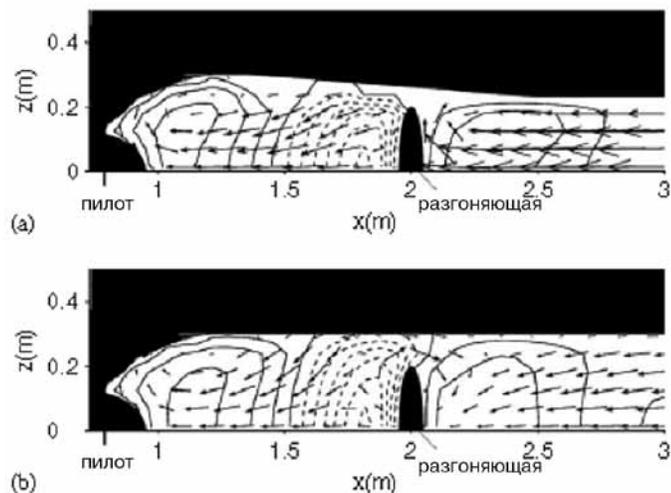


Рисунок 7. Поле скоростей при поперечном разрезе с  $y = 0,4$  м (ось  $y$  направлена вверх). Контуры показывают нормальную составляющую скорости  $v$  со сплошными линиями для положительных величин и пунктирными линиями для отрицательных величин с 25 уровнями от  $-0,25$  до  $0,25$ . Векторы представляют компоненты горизонтальной скорости  $u$  и  $w$ : (а) для стандартного внутреннего контура кузова, показанного на рис. 3, (б) для аналогичного внутреннего контура, но с увеличенной постоянной шириной

### Экспериментальные данные по размеру просвета

Полученные экспериментальные результаты лишь отчасти подтверждают результаты ВАГД-моделирования. При проведении данных экспериментов были разработаны и испытаны четыре разные модификации.

Все они были основаны на использовании накладок, но при этом изучались их различные модификации. Применение одной планки показано на рис. 10 как модификация 3. Оно позволяет добиться лишь частичного и очень незначительного улучшения и только для более высоких чисел Рейнольдса.

Было обнаружено, что размеры планки, ее форма и расположение оказывают влияние на аэродинамическое сопротивление, и ее особая

установка (модификация 4), которая не может быть описана здесь по причине конфиденциальности, обеспечивает существенное снижение общего аэродинамического сопротивления (рис. 10).

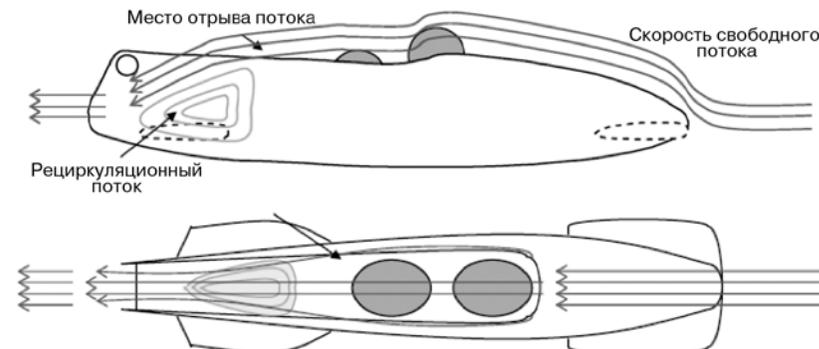


Рисунок 8. Схематическое представление результатов визуализации потока

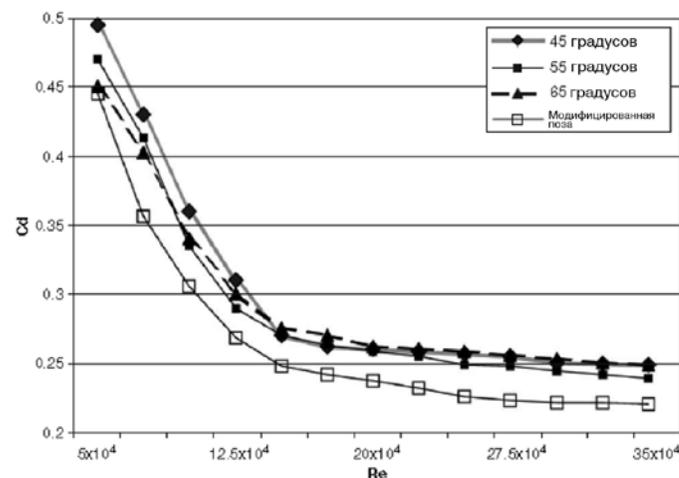


Рисунок 9. Общее аэродинамическое сопротивление боба с наклоном разгоняющей под углом  $45^\circ$ ,  $55^\circ$  и  $65^\circ$  (прямое тело) и  $58^\circ$ -градусном наклоне и модификации шлема

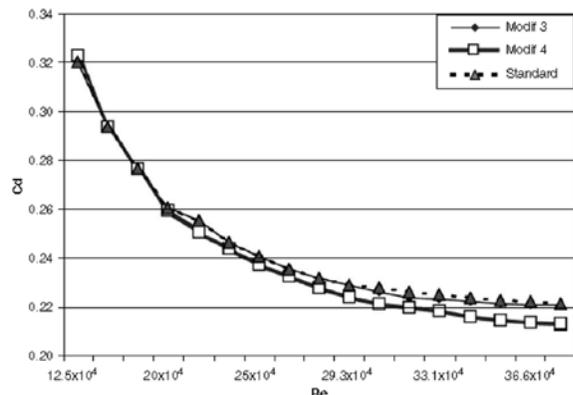


Рисунок 10. Сопоставление различных внутренних модификаций накладок и стандартного боба без накладок

Однако можно заметить отсутствие данных по еще двум модификациям. В действительности они вызвали увеличение аэродинамического сопротивления, которое в одном из случаев достигало 20%, что служит подтверждением потребности в создании более совершенной модели в будущем, обеспечивающей аэродинамическую оптимизацию формы накладки. Однако важно отметить, что применение вычислительной аэрогидродинамики может оказаться очень полезным, поскольку данная задача является до такой степени нелинейной, что оптимальная конструкция не может быть достигнута за счет инкрементных экспериментальных модификаций.

## Выводы

Влияние положения экипажа на аэродинамические характеристики боба изучалось при проведении комбинации вычислительной аэрогидродинамики и экспериментальных исследований. Для вычислительной составляющей данного проекта использовалась модель с упрощенной геометрией, поскольку вычисления выполнялись с применением усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS).

В ходе исследований были получены следующие два основных результата:

1. Наклон вперед разгоняющей способствует снижению сопротивления давления благодаря ограничению вторичного потока между спортсменками, уменьшению турбулентности, создаваемой шлемом, и более эффективному прилипанию потока к спине разгоняющей.
2. Было также обнаружено, что увеличение ширины внутреннего контура кузова оказывает негативное влияние на сопротивление давления вследствие повышения уровней турбулентности вторичного потока. Сужение внутреннего контура вызывало значительное снижение сопротивления давления за исключением не применяемой на практике позы разгоняющей, характеризующейся прямым положением туловища.

*Испытания в аэродинамической трубе полностью подтвердили первый результат исследований.*

В то же время второй результат оказался более сложным для того, чтобы его можно было получить с применением упрощенной модели вычислительных операций.

Экспериментальные испытания продемонстрировали, что общее аэродинамическое сопротивление зависит от фактической формы внутренних накладок, и оптимальное решение задачи может быть достигнуто только при точном моделировании как внешней, так и внутренней геометрии кузова боба. Этой теме посвящены осуществляемые в настоящее время в широком масштабе исследования в области численного моделирования.

Тем не менее, полученные в процессе исследования результаты указывают на то, что разрешенные правилами внутренняя модификация и оптимизация конфигурации экипажа могут способствовать значительному улучшению аэродинамических характеристик.

На основании полученных данных и при условии принятия выбранных пилотом одинаковых траекторий движения и одинакового времени старта было определено, что оптимизация конфигурации экипажа и применение накладок позволяют снизить конечный результат на финише на 0,3 сек. Однако данная оценка является очень консервативной, и вполне вероятно, что испытания полномасштабных моделей позволят достичь даже еще более высокого сокращения финишного времени, которое в бобслее будет соответствовать разнице между первым и десятым местами.

1. Avital, E.J., Sandham, N.D., Luo, K.H., 2000. Stretched Cartesian grids for solution of the incompressible Navier–Stokes equations. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 33, 897–918.
2. Balakin, V.A., Pereverzeva, O.V., 1991. Friction on ice and snow. *Trenie i Izons* 3, 540–551 (in Russian).
3. Bixler, B., Riewald, S., 2002. Analysis of a swimmer’s hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics* 35, 713–717.
4. Bruggemann, G.P., Morlock, M., Zatsiorsky, V.M., 1997. Analysis of the bobsled and men’s luge events at the XVII Olympic winter games in Lillehammer. *Journal of Applied Biomechanics* 13 (1), 98–108.
5. Dabnichki, P., 1998. Biomechanical tests of sport equipment. *Journal of Sport Engineering* 1 (2), 93–105.
6. Dabnichki, P., 2004. Improved aerodynamics and improved safety in bobsleigh design. In: *Fourth International Conference on Advanced Engineering Design*, Glasgow, ISBN: 80-86059-41-3.
7. Dabnichki, P., Motallebi, F., Avital, E., 2002. Protection versus performance in bobsleigh ergonomics design. In: Ujihashi, S. (Ed.), *The Engineering of Sport*. Blackwell Science, Oxford, pp. 297–306.
8. Dabnichki, P., Avital, E., Motallebi, F., 2004a. Advanced bobsleigh design: Part A Body protection, injury prevention and performance improvement. *Proceedings of IMechE Part L: Journal of Material Design & Application* 218 (2), 129–138.
9. Dabnichki, P., Motallebi, F., Luck, D., 2004b. advanced bobsleigh design: Part B Aerodynamics. *Proceedings of IMechE Part L: Journal of Material Design & Application* 218 (2), 139–144.
10. Fédération Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing (FIBT), 2002. Articles of association, international rules, regulations. [www.bobsleigh.com/sport/reg\\_bob.pdf](http://www.bobsleigh.com/sport/reg_bob.pdf), pp. 44–56.
11. Hannah, R.K., 2002. Can CFD make a performance difference in sport? In: Ujihashi, S. (Ed.), *The Engineering of Sport*. Blackwell Science, Oxford, pp. 17–30.
12. Hokkirigawa, K., 1998. Tribology of bobsleigh—development of bobsleigh-runner for Nagano Olympic. *Journal of Japanese Society of Tribologists* 43 (1), 21–26.
13. Hokkirigawa, K., 2002. Tribology in bobsleigh and skeleton—toward Salt Lake from Nagano. *Journal of Japanese Society of Tribologists* 47 (2), 69–74.
14. Hubbard, M., Kallay, M., Rowhani, P., 1989. 3-dimensional bobsled turning dynamics. *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (2), 222–237.
15. Leonardi, L.M., Cecioni, N., Dalmonte, A., Komor, A., 1985. Pushoff phase influence on bobsled result—a theoretical approach. *Journal of Biomechanics* 18 (7), 551.
16. Mentor, F.R., 1991. Influence of freestream values on k– $\epsilon$  turbulence model predictions. *AIAA Journal* 30 (16), 1657–1659.
17. Motallebi, F., Avital, E., Dabnichki, P., 2002. On the aerodynamics of two man bobsleigh. In: *Fourth International Conference on Engineering of Sport Proceeding of ISEA, 2002*, Blackwell Science, Oxford, pp. 346–352.
18. Rebsch, H., Jost, M., Debus, K., Bosse, H., Fleischer, G., 1991. Optimierung des Gleitverhaltens Zwischen Metallischen Kufenwerkstoffen und Eis. *Tribologie und Schmierungstechnik* 38 (6), 346–351 (in German).
19. Wilcox, D.C., 1998. *Turbulence Modeling for CFD*. 2nd ed. DCW Industries, Inc., La Canada, pp. 119–122.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВУХМЕСТНОГО БОБА

---

*Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh Oscar Lewis*  
([http://www.tudelft.nl/live/binaries/d4d3851g-4916-4c6e-af53-31f35b703469/doc/2006\\_1\\_15.pdf](http://www.tudelft.nl/live/binaries/d4d3851g-4916-4c6e-af53-31f35b703469/doc/2006_1_15.pdf))

Бобслей ведет свое происхождение с конца 19 века, а с 50-х годов прошлого столетия он становится высокотехнологичным видом спорта. В настоящее время для конструирования скоростных бобслейных саней используют технологии NASCAR (Национальной ассоциации автогонок на серийных автомобилях) и Формулы 1.

После старта боба на него действует только одна единственная движущая сила – сила тяжести, и при отсутствии ошибок рулевого только две силы препятствуют движению саней – аэродинамическое сопротивление и трение о лед. Простое уравнение движения боба свидетельствует о том, что сила аэродинамического сопротивления во время спуска оказывает значительное влияние на результат, показываемый на финише. *Согласно прогнозам снижение аэродинамического сопротивления на 3% вызывает сокращение финального времени на одну десятую секунды.*

Базовая форма саней определяется международными правилами. Незначительным изменениям могут подвергаться, например, бамперы, зазор между передним и задним обтекателем, форма носового конуса, а также края рессорных листов и кронштейнов полозьев. Однако модификация конструкции боба в значительной степени ограничивается тем фактом, что боб должен иметь выпуклую форму, и при этом не допускается применение отверстий или турбулизаторов потока.

Для изучения потока применялся целый ряд измерений и методов визуализации. Для измерения сил были использованы шестикомпонентные аэродинамические весы. Для исследования поверхностного потока применялась визуализация потока с созданием масляного

тумана. Как количественная, так и качественная информация была получена с помощью велосиметрии образов частиц. Для локализации вихрей применялись пучки шерсти и микрофон.

На заключительной стадии выполнялись расчеты с помощью моделирования на основе вычислительной аэрогидродинамики. Усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса с реализуемой к-моделью турбулентности были решены для половины модели, поскольку предполагается, что данная модель является симметричной. Полученные результаты расчета потока как в качественном, так и в количественном отношении хорошо согласуются с теорией и результатами испытаний в аэродинамической трубе.

Большое количество усилий было сосредоточено на переходе между передним и задним обтекателем. Причина этого заключается в том, что эта область отличается достаточно легкой адаптацией к изменениям, поэтому все усовершенствования в этой части боба были применены голландскими бобслейными командами во время олимпийских игр. Были также проведены исследования многих других изменений, например, положения экипажа и поворота носового конуса.

*На основе полученных результатов можно сделать вывод, что следует частично устранить зазор между передним и задним обтекателем, оставив его только в верхней части. К другим факторам, способствующим снижению аэродинамического сопротивления боба, относят выбор шлема, уменьшающего аэродинамическое сопротивление, оптимизация положения экипажа, придание округлой формы кронштейнам полозьев и обеспечение как можно более гладкой поверхности носового конуса.*

*Существует еще несколько тем, требующих проведения дополнительных исследований.* Например, следует обратить внимание на влияние формы носового конуса на аэродинамическое сопротивление. Необходимо также изучить и по возможности снизить аэродинамическое сопротивление осей, листовых рессор, полозьев и кронштейнов полозьев.

## ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ БОБСЛЕЯ ПОСРЕДСТВОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*Improving the Performance of a Bobsleigh by Aerodynamic Optimization*

*A. Winkler and A. Pernpeintner*

*(The Engineering of Sport, – 2008, – Vol. 2, – pp. 229-338)*

Бобслей является одним из самых быстрых зимних видов спорта. Сопротивление движению боба во время спуска создается силами трения между полозьями и ледовой поверхностью трассы, а также силой аэродинамического сопротивления. Во время бобслейного спуска максимальная скорость достигает от 130 до 140 км/ч. Аэродинамическое сопротивление составляет примерно 25% суммарного сопротивления.

Обтекатель с открытым верхом и постоянно меняющиеся контурные условия трассы создают довольно сложный поток вокруг боба. Однако в основе проектирования более совершенной с точки зрения аэродинамических характеристик формы бобслейных саней обычно лежит применение эмпирических методов. Это может объясняться тем фактом, что в области проектирования и изготовления бобслейных саней преобладают мелкие и средние компании с ограниченными людскими и финансовыми ресурсами.

Достижение более фундаментальной аэродинамической оптимизации в бобслее требует применения высокоэффективных вычислительных и экспериментальных методов, которые с успехом реализуются в автомобильной и авиационной промышленности.

Преыдушие исследования в основном ограничивались применением либо вычислительных (Dabnichki et al., 2002, Togneri, 2006, Reimann, 2008), либо экспериментальных (Heckelmann, 2001) методов. Исследования, в которых использовались оба данных подхода, как правило, фокусировались на детальном изучении потока (Dabnichki and Avital, 2006), и при этом в них в значительной степени игнорировалось важное влияние полозьев (Lewis, 2006).

*Короче говоря, общими чертами всех упомянутых работ является то, что они или концентрируются на изучении поля потока вокруг определенной формы боба и/или направлены на оптимизацию каких-либо его деталей.*

*Целью данной статьи* является описание процесса оптимизации аэродинамических характеристик боба для женской двойки с помощью методов, применяемых при исследовании аэродинамических свойств дорожных транспортных средств и гоночных автомобилей.

*Применение эффективной комбинации вышеупомянутых методов на различных стадиях проектирования позволяет создавать инновационные конструкции боба.* В статье приведено описание методов, обычно применяемых на стадии предварительной конструкторской разработки и во время фазы оптимизации деталей, и содержатся предложения по обеспечению качества проектирования эффективных аэродинамических конструкций в бобслее.

### Параметрическая модель для автоматизированного проектирования в бобслее

Основные компоненты, создающие аэродинамическое сопротивление, и применяемая при моделировании система координат представлены на рисунке 1а. Начало координат находится на носовом конусе боба, и ось  $x_1$  соответствует направлению свободного (набегающего) потока  $V_\infty$ . К этим компонентам относятся передние бамперы (ПБ), передняя ось (ПО), передние полозья (ПП), обтекатель, шлем пилота, задние бамперы (ЗБ), задняя ось (ЗО) и задние полозья (ЗП).

С точки зрения динамических аспектов управления обтекателем подразделяется на передний и задний обтекатели, которые могут поворачиваться относительно друг друга. Стык между передним и задним обтекателями герметизируется резиновым профилем. В зависимости от текущего угла продольного наклона может иметь место несоосность (смещение) обтекателя, что будет способствовать еще большему увеличению аэродинамического сопротивления.



Рисунок 1. Компоненты боба и изображение экипажа

Среди сил сопротивления всех компонентов преобладает сила сопротивления давления. Она возникает в пограничных слоях, отрывающихся от контура и всех острых граней. Оторвавшийся поток формирует след сзади тела и создает отрицательное давление на его заднюю сторону.

Вторым источником сопротивления служит напряжение сдвига, действующее на поверхность тела. При обтекаемых формах типичный процент сопротивления давления составляет от 60 % до почти 100 %, поэтому при оптимизации аэродинамического сопротивления в фокусе внимания находится именно сопротивление давления (Nicho, 2002 & 2005). Снижение аэродинамического сопротивления достигается путем модификации формы компонентов боба. *Поскольку все компоненты боба оказывают влияние на окружающее его поле обтекания, следует иметь в виду, что модификация одного или малого числа компонентов будет способствовать только незначительному улучшению аэродинамических свойств боба.*

В целях систематизированной разработки оптимальной аэродинамической формы боба была создана трехмерная параметрическая модель для автоматизированного проектирования с применением программного обеспечения CATIA V5 © (Braß, 2005). Первый этап моделирования заключался в выявлении основных параметров формы и представление их в виде каркасной модели. На основе каркасной модели затем была создана двухмерная (плоскостная) модель.

Чтобы уменьшить сложность моделирования на основе методов вычислительной аэрогидродинамики, форма боба была упрощена с

учетом изложенных выше требований. *Было принято решение игнорировать мелкие детали, такие как винты и гайки, а также углубление для тормозной системы на дне боба и резиновое уплотнение между передним и задним обтекателями.*

Значительное упрощение формы было предпринято также при моделировании членов экипажа боба. Голова пилота представлена в виде шлема типичной формы, часть которого подвергается воздействию потока.

Тела пилота и разгоняющего были изображены в упрощенной форме в горизонтальной и наклонной плоскостях. Эти две плоскости обрабатывались в процессе моделирования как часть обтекателя. На рисунке 1b показано упрощенное изображение формы экипажа боба. В то время как положение шлема является фиксированным и соответствует позе пилота, угол спины разгоняющего  $\theta$  может меняться.

Всего было создано более 100 различных вариантов формы боба при соблюдении правил Международной федерации бобслея и тобогана (ФИБТ, 2005). Все эти варианты были преобразованы в формат данных IGES с целью достижения совместимости с программным обеспечением, применяемым для создания расчетной сетки. В результате основанного на вычислительной аэрогидродинамике моделирования была разработана предварительная оптимизированная форма для изготовления модели, предназначенной для испытаний в аэродинамической трубе.

### Моделирование на основе вычислительной аэрогидродинамики

На предварительной стадии проектирования выполнялось моделирование на основе вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД-моделирование) с применением программного обеспечения ANSYS CFX © (ANSYS CFX 2007).

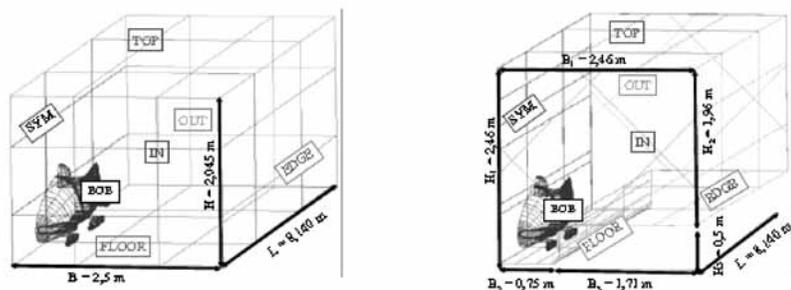
Моделирование потока осуществлялось при допущении, что он является несжимаемым, вязким и турбулентным. В настоящем исследовании использовался подход, основанный на применении усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS).

Моделирование турбулентности выполнялось с использованием модели переноса сдвиговых напряжений (ПСН) с высоким числом Рейнольдса, которая была разработана Менгером (Menter, 1992). В основе данного подхода лежит предположение, что структура турбулентности может быть охарактеризована с применением шкалы длины и шкалы времени или скорости, определяемых путем измерения турбулентной кинетической энергии и коэффициента рассеяния турбулентности. *Модель ПСН сочетает преимущества обеих хорошо известных моделей k-ε- и k-ω и рекомендуется для потоков с отрывом пограничного слоя.*

Дискретизация вычислительного домена потока осуществлялась с помощью неструктурированной расчетной сетки, состоящей из четырехугольных и треугольных элементов, которые обеспечивают как хорошее качество сетки, так и адекватное разрешение получаемой формы тела.

Было определено два разных домена, представляющие участок трассы на вираже и прямой участок трассы. Во время движения на повороте в боковом направлении вблизи от боба нет ограничивающих стенок, которые, однако, находятся в непосредственной близости от него при движении по прямому участку трассы.

Первый домен D1 представляет участок на вираже и изображен на рисунке 2а, включая наименование граничных стенок. На рисунке 2б показан домен D2, представляющий типичный прямой участок ледовой трассы.

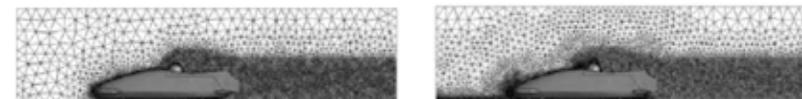


а) Домен D1, представляющий участок на вираже

б) Домен D2, представляющий прямой участок

Рисунок 2. Домены потока и их границы

На рисунке 3а показана расчетная сетка M1, которая применялась для анализа модификаций формы боба. Она состоит из 3,1 миллионов элементов и около 550 тысяч узлов и разделяет граничный слой 10 узлами. Область следа вниз по потоку представлена более детально. На рисунке 3б показана сетка M2, которая похожа на сетку M1, но имеет даже еще более высокую разрешающую способность между бобом и дном желоба. Поэтому в этой области она состоит примерно из 12 миллионов элементов и около 2 миллионов узлов.



а) сетка M1

б) сетка M2

Рисунок 3. Вид сбоку на плоскость симметрии вычислительных сеток, созданных с применением программного обеспечения ICEM CFD ©.

В таблице 1 указаны граничные условия (ГУ) ВАГД-моделирования. ГУ1 представляют условия в аэродинамической трубе с фиксированным полотном, а ГУ2 – с движущимся полотном для моделирования относительного движения боба и ледовой трассы.

Таблица 1. Граничные условия вычислительных доменов потока

Граница	Граничное условие
IN (ВНУТРЕННЯЯ)	Скорость входящего потока $V=36,11$ м/с
OUT (ВНЕШНЯЯ)	Разница давления на выходе $\Delta p = p_{OUT} - p_{\infty} = 0$
FLOOR (ПОЛОТНО)	ГУ1 – преграда (стенка) без проскальзывания потока, неподвижное полотно; ГУ2 – преграда без проскальзывания потока, подвижное полотно $V_{FLOOR} = 36,11$ м/с
TOP (ВЕРХ)	Стенка со свободным проскальзыванием потока
EDGE (КРАЙ)	Стенка со свободным проскальзыванием потока
SYM (СИМ.)	Симметрия
BOB (БОБ)	Преграда (стенка) без проскальзывания потока

В качестве стандартной конструкции (RefBob) применялась уже существующая форма боба. Влияние различных граничных условий и доменов на аэродинамическое сопротивление показано на рисунке 4а. Здесь можно видеть, что в суммарном аэродинамическом сопротивлении доминирует сопротивление давления, доля которого составляет 80%. Очевидно, что при прохождении прямого участка (домен D2) стены ледовой трассы вызывают увеличение сопротивления примерно на 4% при ГУ1 и 5% при ГУ2. И, наконец, было продемонстрировано воздействие движущегося полотна на аэродинамическое сопротивление при движении как на вираже, так и по прямому участку.

ГУ2 приводили к снижению сопротивления примерно на 1%, что указывает на слегка завышенные результаты, получаемые в аэродинамической трубе, по сравнению с реальными условиями соревнований в бобслейном спуске.

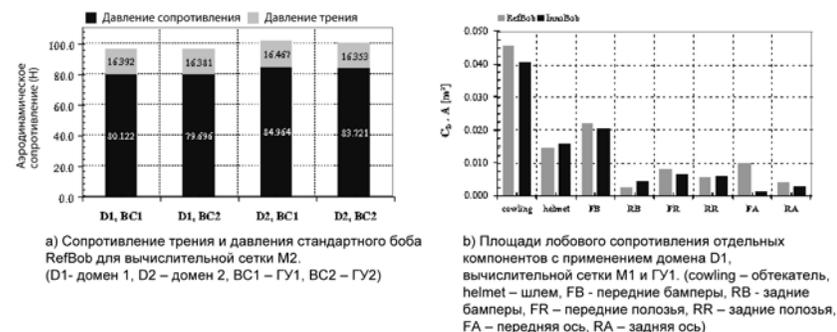


Рисунок 4. Силы сопротивления стандартного боба RefBob и инновационного боба InnoBob

Аэродинамическое сопротивление D рассчитывается с применением уравнения (1) и зависит от безразмерного коэффициента сопротивления CD, площади лобовой поверхности боба A и динамического давления свободного потока (набегающего потока):

$$D = C_D A (p_\infty / 2) V_\infty^2 \quad (1)$$

Аэродинамическое сопротивление может быть снижено путем уменьшения коэффициента сопротивления и площади лобовой поверхности. Однако иногда оба эти измерения могут противоречить друг другу.

Таким образом, оптимизация аэродинамического сопротивления в основном означает достижение баланса между коэффициентом сопротивления и площадью лобовой поверхности, при котором обеспечивается минимальное сопротивление. Что касается рассматриваемой инновационной модели боба, достигнутый баланс между данными двумя параметрами способствовал получению формы боба, позволившей снизить аэродинамическое сопротивление примерно на 13%. На рисунке 4b сопротивление стандартной (RefBob) и инновационной (InnoBob) моделей показано в виде площади лобового сопротивления CD A, рассчитанной для их основных компонентов.

Наибольшая оптимизация аэродинамического сопротивления была достигнута для обтекателя и передней оси инновационной модели. В то время как снижение сопротивления обтекателя можно объяснить общей модификацией формы, резкое уменьшение сопротивления цилиндрической передней оси достигалось за счет ее большего покрытия обтекателем. Эти два примера служат подтверждением того, что оптимизация аэродинамических характеристик тела необтекаемой формы должна предусматривать как оптимизацию отдельных элементов, так и оптимизацию всей системы в целом.

Обтекатель с открытым верхом вызывает отрыв потока у его переднего края и образование вихря в форме треугольного крыла, как показано на рисунке 5а. Как известно, этот тип вихря обладает высокими скоростями вращения и, следовательно, создает области низкого давления. Коэффициент давления рассчитывается с помощью уравнения (2),

$$C_p = \frac{p_{local} - p_\infty}{(p_\infty / 2) V_\infty^2} \quad (2)$$

и на рисунке 5b он показан на секущей плоскости x2-x3 в позиции x1 = 1,65 м. Как можно видеть на рисунке 5, закручивающиеся линии воздушного потока соответствуют отрицательному коэффициенту давления и потому являются источником существенного сопротивления.

В результате моделирования с применением двух разных величин угла сгибания спины разгоняющего было продемонстрировано, что отрицательное давление может быть снижено путем увеличения величины данного угла.

Таким образом, было показано, что положение и поза разгоняющего оказывают значительное влияние на аэродинамическое сопротивление, поэтому они были подвергнуты дальнейшему анализу при проведении испытаний в аэродинамической трубе.

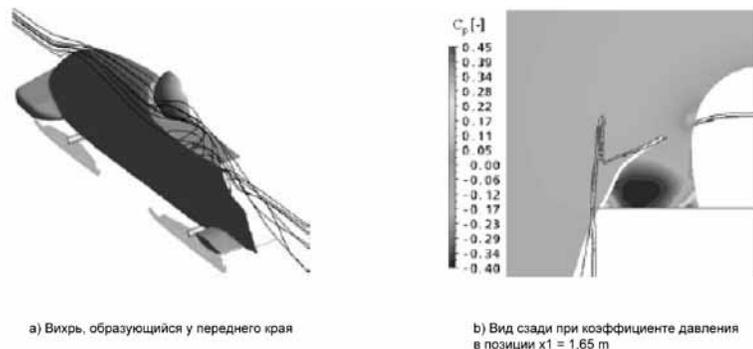


Рисунок 5. Вихрь, образующийся у переднего края обтекателя с открытым верхом, для D1, M2 и ГУ2.

### Испытания в аэродинамической трубе

Испытания в аэродинамической трубе модели боба, выполненной в масштабе 1:3, проводились в целях оптимизации деталей формы и оценки результатов ВАГД-моделирования.

Испытываемая модель соответствовала варианту формы боба с минимальным аэродинамическим сопротивлением, который был разработан во время предварительной фазы проектирования. Модель была закреплена на плоской платформе в целях имитации движения на повороте и обеспечения сходства с доменом потока D1. Дополнительно в измерительной части аэродинамической трубы были установлены боковые панели (рис. 6), чтобы имитировать прямой участок ледовой трассы, то есть создать условия, эквивалентные ситуации, для которой был разработан вычислительный домен D2.



Рисунок 6. Модель, испытываемая в аэродинамической трубе, и боковые панели, установленные в измерительной части аэродинамической трубы

Коэффициенты сопротивления, полученные в процессе ВАГД-моделирования и испытаний в аэродинамической трубе, сравниваются в таблице 2.

На основе данного сравнения можно сделать два вывода. **Во-первых**, ВАГД-моделирование приводило к недооценке результатов примерно на 4% по сравнению с экспериментальными данными. **Во-вторых**, было подтверждено увеличение аэродинамического сопротивления на прямом этапе трассы, выявленное в ходе моделирования на основе вычислительной аэрогидродинамики.

Таблица 2. Сравнение коэффициентов сопротивления, полученных при проведении ВАГД-моделирования и испытаний в аэродинамической трубе при  $Re_{\infty} = 6,62 \cdot 10^5$

	Домен	Граничные условия	Расчетная сетка	Коэффициент сопротивления CD [-]
ВАГД	D1	ГУ1	M1	0,229
Аэродинамическая труба	без панелей	-	-	0,239
ВАГД	D2	ГУ1	M1	0,247
Аэродинамическая труба	с панелями	-	-	0,256

Зависимость аэродинамического сопротивления от позы разгоняющего становится очевидной при анализе результатов, представленных на рисунке 7а.

При увеличении угла сгибания спины сопротивление снижается. Однако следует иметь в виду, что существуют определенные ограничения в силу анатомических причин. Поэтому желательно проведение дополнительных испытаний в аэродинамической трубе с полномасштабным бобом и настоящим экипажем.

Другим исследуемым аспектом было влияние на аэродинамическое сопротивление угла рыскания  $\beta$ . При идеальном движении центральная ось боба всегда обращена по направлению движения, и поэтому угол рыскания  $\beta$  равен 0.

Однако при ошибке пилота может возникать «рыскание» боба. В целях имитации подобной ситуации при движении по прямому участку исследовались различные «углы рыскания» боба во время испытаний в аэродинамической трубе. На рисунке 7б показано повышение аэродинамического сопротивления при увеличении «угла рыскания». Это связано с увеличением блокирующего воздействия ледовой трассы при повышенном «угле рыскания».

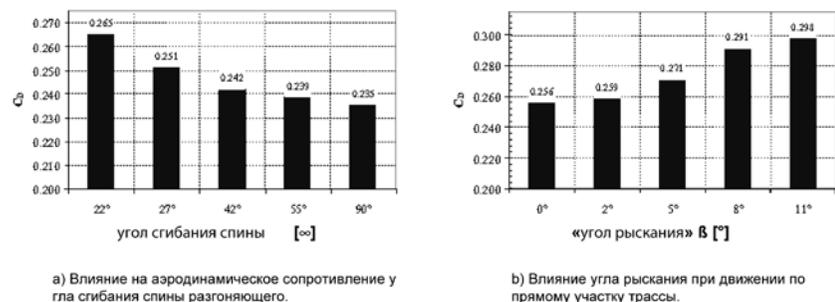


Рисунок 7. Влияние на аэродинамическое сопротивление угла сгибания спины разгоняющего и «угла рыскания» (угла наклона в поперечном направлении) при  $Re^\infty = 6,62 \cdot 10^5$

Существует дополнительный потенциал снижения аэродинамического сопротивления в задней части обтекателя. Вместе с дном боба задний обтекатель образует диффузор, который создает замедление потока в этой области. Более низкие скорости потока вызывают повышение давления, что приводит к снижению аэродинамического

сопротивления. При этом в роли решающих переменных выступают угол при вершине  $\gamma$ , как показано на рисунке 8а и контур диффузора.

Результаты оптимизации диффузора представлены на рисунке 8б, при этом понятия «массивный» и «компактный» характеризуют разные контуры соответствующего диффузора. На основе данных результатов можно сделать вывод, что минимальное аэродинамическое сопротивление достигается только при выборе наиболее подходящей комбинации обоих параметров. В то время как более компактные диффузоры способствуют снижению сопротивления при  $\gamma = 2^\circ$  и  $\gamma = 4,5^\circ$ , применение массивного диффузора позволяет получить более низкое сопротивление при угле  $\gamma = 6,7^\circ$ .

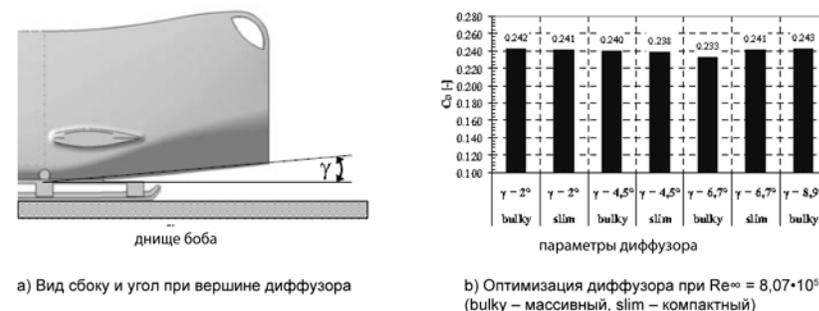


Рисунок 8. Геометрия диффузора и результаты оптимизации

Были проведены исследования зависимости аэродинамического сопротивления от угла атаки бамперов, результаты которых продемонстрировали незначительное снижение сопротивления при углах атаки, отличных от нуля.

Чтобы обеспечить хорошую эффективность отталкивания на старте, потребовалось внести ряд изменений в форму заднего обтекателя. Эти изменения привели к увеличению сопротивления, которого невозможно было избежать. Были проведены испытания нескольких модификаций формы боба в целях минимизации отрицательного давления на задний обтекатель.

Результаты экспериментов в аэродинамической трубе учитывались при разработке модели для автоматизированного проектирования.

Таким образом, был создан окончательный оптимизированный вариант формы боба, показанный на рисунке 9, который будет служить основой для изготовления полномасштабного опытного образца. Данная инновационная модель боба, аэродинамические свойства которой были оптимизированы в результате ВАГД-моделирования и испытаний в аэродинамической трубе, позволяет снизить аэродинамическое сопротивление по сравнению со стандартной моделью (RefBob) примерно на 13%.



Рисунок 9. Инновационная модель боба (InnoBob) с оптимизированными аэродинамическими характеристиками.

### Выводы и перспективы

В данной статье описывается процесс улучшения рабочих характеристик боба путем снижения его аэродинамического сопротивления. Для этой цели применялись средства и методы, которые с успехом используются в аэродинамике дорожных транспортных средств и гоночных автомобилей. Начиная с параметрической трехмерной модели для автоматизированного проектирования, были разработаны многочисленные варианты различных форм боба.

На стадии предварительного проектирования выполнялось моделирование на основе вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД-моделирование) в целях обнаружения базовой формы с минимальным аэродинамическим сопротивлением.

Были проведены испытания в аэродинамической трубе модели, изготовленной в масштабе 1:3, в целях оптимизации ее отдельных деталей и экспериментального подтверждения результатов ВАГД-моделирования. **Таким образом, была выявлена оптимизированная форма боба, обеспечивающая 13% снижение сопротивления по сравнению с существующими конструкциями.**

Была продемонстрирована значительная зависимость аэродинамического сопротивления от позы разгоняющего.

В ближайшем будущем планируется изготовление полномасштабного опытного образца боба и проведение испытаний в аэродинамической трубе и в условиях реального бобслейного спуска для выполнения окончательной оценки и подтверждения качества применяемых инструментов аэродинамической оптимизации.

1. [A1] ANSYS CFX-11.0. Online-Manual. 2007.
2. [B1] Braß E. Konstruieren mit CATIA V5 – Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenmodellierung. Hanser Verlag, 3.Auflage, 2005.
3. [DA1] Dabnichki P., Avital E. Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh. Journal of Biomechanics 39, 2733-2742, 2006.
4. [DM1] Dabnichki P., Motallebi F., Avital. Protection versus performance in bobsleigh ergonomic design. Foruth International Conference on Engineering of Sport, Proceedings of ISEA, Blackwell Sciences, Oxford, pp. 346 – 352, 2002.
5. [F1] Federation Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing (FIBT). Internationales Reglement. Ausgabe 2005.
6. [H1] Heckelmann I. Windkanaluntersuchungen zur Optimierung des Luftwiderstands eines Sportbobs. Term Paper, Lehrstuhl für Fluidmechanik, TU München, 2001.
7. [H2] Hucho W. Aerodynamik stumpfer Körper. Vieweg, 1. Auflage, 2002.
8. [H3] Hucho W. Aerodynamik des Automobils. Vieweg, 5.Auflage, 2005.
9. [L1] Lewis O. Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh. Master of Science Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft, October 2006.
10. [M1] Menter F. Improved Two-Equation k-Turbulence Models for Aerodynamic Flows. NASA Technical Memorandum 103975, October 1992.
11. [R1] Reimann M. Verminderung des aerodynamischen Widerstands eines Rennbobs durch Formänderung und Nachlaufbeeinflussung. Term Paper, Lehrstuhl für Aerodynamik, TUMünchen, 2008.
12. [T1] Togneri M. Computational fluid dynamic (CFD) modelling of the flow around a bobsled. Diploma Thesis, Lehrstuhl für Aerodynamik, TU München, 2006.

## КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАРТОВОГО РАЗГОНА В МУЖСКОМ БОБСЛЕЕ

---

*Kinematic analysis of men bobsled push starts*

*Sarah L. Smith<sup>1</sup>, Derek M. R. Kivi<sup>2</sup>, Heidi Camus<sup>3</sup>, Robert Pickels<sup>4</sup>, William A. Sands<sup>1</sup>*

*1. U. S. Olympic Committee, Colorado Springs, CO. USA*

*2. University of Alberta, Edmonton, AB Canada*

*3. Colorado State University, Fort Collins, CO. USA*

*4. Montana State University, Bozeman, MT. USA*

*(XXIV ISBS Symposium, Salzburg – Austria, – 2006)*

Разгон боба на старте служит одним из основных факторов, определяющих конечный результат времени бобслейного спуска. Важность данного аспекта результативности бобслея традиционно признается как спортсменами, так и тренерами.

В то же время документальное подтверждение данной взаимосвязи в спортивной литературе ограничивается всего лишь тремя ссылками, которые нам удалось обнаружить. Так, была выявлена значительная взаимозависимость между временем разгона и результатом на финише во всех четырех заездах соревнований мужской четверки, а также для всей группы участников во время зимних олимпийских игр 1988 года в Калгари, Канада. Для данных четырех заездов и для всей группы коэффициенты корреляции составили 0,53, 0,74, 0,67, 0,55 и 0,46, соответственно (Morlock & Zatsiorsky, 1989). Анализ показателей времени разгона и финиша во время зимней олимпиады 1994 года в Лиллехаммере продемонстрировал, что примерно 77% ( $r = 0,88$ ) дисперсии результатов времени, показанных на финише, объяснялось различиями во времени стартового разгона боба (Bruggemann, Morlock & Zatsiorsky, 1997). Это было подтверждено для соревнований как мужских двоек, так и четверок во всех четырех заездах, которые рассматривались как одна группа. Опыты

компьютерного моделирования бобслейного спуска мужской четверки также подтвердили важность исходного импульса толкающего усилия на старте для конечного результата заезда (Leonardi, Komor & Dal Monte, 1985).

Коэффициенты корреляции для четырех заездов женских соревнований на чемпионате мира по бобслею 2005 года в Калгари составили, соответственно, 0,79, 0,76, 0,73 и 0,64. (Смит, неопубликованные данные).

Несмотря на значение времени стартового разгона для результативности, до настоящего времени отсутствуют известные научные публикации по анализу техники стартового разгона с учетом ее биомеханического аспекта.

В связи с этим *основная цель настоящего исследования* состояла в анализе стартового разгона в мужском бобслее с кинематической точки зрения и определении взаимозависимости между временем старта и финиша.

*Второй целью* было исследование других возможных значимых взаимосвязей между временем стартового разгона и измеряемыми кинематическими переменными.

### **Методы Сбор данных**

Сбор видеоданных проводился во время соревнований бобслеистов-мужчин по отбору в национальную команду США, проводимых в Лейк-Плэсиде, штат Нью-Йорк. В роли исследуемых субъектов выступали одиннадцать спортсменов, претендующих на место в команде в качестве разгоняющих: они соревновались в шести заездах в течение двух дней соревнований. Для проведения двухмерного биомеханического анализа были получены высокоскоростные черно-белые видеоизображения (с частотой дискретизации 120 Гц) правого бока разгоняющих. Камера располагалась на расстоянии 7,50 м перпендикулярно плоскости движения разгоняющих. В связи с тем, что ледовую трассу окружает бетонная стена, камера была установлена на высоте 3,12 м под углом, позволяющим осуществлять съемку ног бобслеиста. Скорость затвора составляла 1/500 с. при

поле обзора примерно 6,5 м. Перед проведением сбора видеоданных была проведена видеосъемка с применением калибровочной рамки размерами 2,09 м на 1,54 м.

Видеоизображения записывались на магнитную ленту S-video видеоманитофоном Panasonic AG-1960 VCR, модифицированным для функционирования при частоте дискретизации 120 Гц.

### **Анализ данных**

Для анализа данных каждого разгоняющего отбирались результаты одного испытания, при этом критериями отбора служили как лучшее время старта, так и информация от тренера на старте.

Для проведения двухмерного анализа применялась компьютерная программа Motus (версия 8.5), созданная компанией Peak Performance Technologies, Inc. Данная программа автоматически корректировала нижний наклон камеры относительно прямоугольной калибровочной рамки. 20-точечная модель разгоняющего была представлена в цифровой форме от начала движения разгона на старте до отталкивания при четвертом шаге спортсмена, когда его тело находилось вне поля обзора. Ключевые элементы каждого технического приема определялись путем визуального осмотра в процессе преобразования в цифровую форму. Кинематические переменные, измеряемые для проведения анализа, были подразделены на следующие группы: (1) длина шага, (2) частота шагов, (3) время контакта, (4) скорость центра масс, (5) угол наклона туловища, (6) угол сгибания колена и (7) угол сгибания локтя.

Угол наклона туловища измерялся с помощью отрезка, проведенного от бедра к плечу относительно правой горизонтальной плоскости; углы, образуемые при сгибании ноги в коленном, и руки в локтевом суставах, также определялись посредством измерения соответствующих отрезков.

### **Статистический анализ**

В каждой группе переменных была рассчитана описательная статистика для применения каждого специфического измерения.

Измерениям подвергались элементы разгона на старте, эффективность и важность выполнения которых хорошо осознаются спортсменами и их тренерами.

Был проведен корреляционный анализ в целях определения взаимозависимости между временем старта и финиша; переменные всех кинематических измерений были сопоставлены с временем старта в рамках исследовательского анализа данных. Все статистические показатели рассчитывались путем выполнения аналитических процедур, предусмотренных программой 2003 Microsoft Office Excel.

## Результаты

В следующих трех таблицах показана описательная статистика для переменных, которые измерялись при проведении данного кинематического анализа. Средние величины и стандартные отклонения длины шагов, частоты шагов и времени контакта стопы с поверхностью представлены в таблице 1.

Таблица 1. Средние величины и стандартные отклонения длины и частоты шагов, а также времени контакта стопы с поверхностью

	Длина шагов (м)	Частота шагов (шагов/с)	Время контакта стопы (с)
Шаг 1	0,80 ± 0,13	3,31 ± 0,77	0,28 ± 0,05
Шаг 2	0,97 ± 0,19	3,93 ± 0,31	0,22 ± 0,07
Шаг 3	1,10 ± 0,15	4,22 ± 0,52	0,21 ± 0,02
Шаг 4	1,15 ± 0,25		0,18 ± 0,07

Разгоняющие начинают старт с обеими стопами ног, расположенными у края плоской горизонтальной структуры, которая слегка приподнята над уровнем льда и называется стартовым блоком. Средние величины и стандартные отклонения горизонтальной скорости центра масс у разгоняющих при отталкивании на разных этапах стартового разгона указаны в таблице 2.

Средние величины и стандартные отклонения углов наклона туловища и углов, образуемых при сгибании ноги в коленном, и руки

в локтевом суставе приведены в таблице 3. Эти величины определялись при отталкивании или приземлении на разных этапах разгона.

Таблица 2. Средние величины и стандартные отклонения горизонтальной скорости центра масс в положении отталкивания

	Горизонтальная скорость центра масс (м/с)
Отталкивание на блоке	2,48 ± 0,39
Отталкивание на 1 шаге	4,06 ± 0,43
Отталкивание на 2 шаге	5,03 ± 0,28
Отталкивание на 3 шаге	5,55 ± 0,33
Отталкивание на 4 шаге	5,59 ± 0,40

Таблица 3. Средние величины ± стандартные отклонения углов наклона туловища и углов в коленном и локтевом суставах

	Угол наклона туловища (град)		Угол сгибания в коленном суставе (град)		Угол сгибания в локтевом суставе (град)	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Отталкивание на 1 блоке	4,02	± 8,79	Приземление при 1-ом шаге	102,24 ± 15,58	Отталкивание на 1 блоке	124,64 ± 32,29
Отталкивание на 2 блоке	28,73	± 9,64	Отталкивание при 1-ом шаге	138,31 ± 14,44	Отталкивание на 2 блоке	76,53 ± 24,35
Отталкивание при 1 шаге	28,90	± 9,69	Приземление при 2-ом шаге	100,65 ± 9,20	Отталкивание на 1 шаге	88,61 ± 15,94
Отталкивание при 2 шаге	30,65	± 6,17	Отталкивание при 2-ом шаге	152,88 ± 6,42		
Отталкивание при 3 шаге	26,69	± 7,41				
Отталкивание при 4 шаге	30,11	± 10,00				

Соотношение между временем старта и финиша составило 0,63 и было статистически значимым ( $r_{2-остатка} = 0,602$ ,  $p = 0,05$ ).

Были также проведены исследования соотношений между показателем времени на старте и другими переменными, измеряемыми в ходе настоящего исследованиями.

Особый интерес представляет соотношение  $r = -0,63$  между временем стартового разгона и горизонтальной скоростью центра масс при

отталкивании на 2-ом шаге. Хотя этот результат носит предварительный характер, он открывает новые перспективы в исследованиях, так как указывает на существование взаимозависимости между кинематическими переменными и наиболее успешными стартовыми разгонами. Соотношение между временем старта и конечным результатом на финише, с одной стороны, и горизонтальной скоростью центра масс при отталкивании на 2-ом шаге, с другой стороны, показано на рисунке 1.

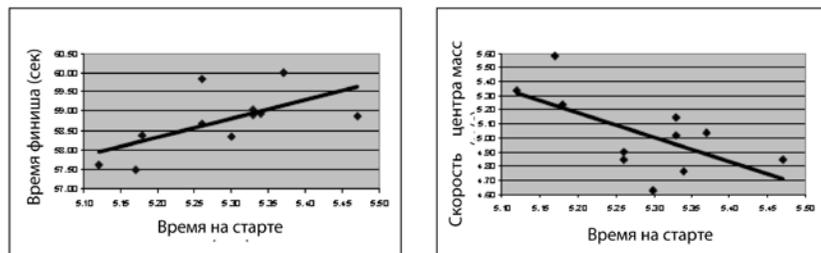


Рисунок 1. Соотношение между временем старта, конечным результатом на финише и горизонтальной скоростью центра масс при отталкивании на 2-ом шаге

### Обсуждение

В результате проведения данного анализа была получена кинематическая характеристика главных аспектов, лежащих в основе биомеханики бобслейного стартового разгона, выполняемого высококвалифицированными разгоняющими в условиях проведения соревнований по бобслею среди мужчин.

Средние показатели длины шага указывали на некоторую тенденцию к ее увеличению по мере выполнения первых четырех шагов. Как и предполагалось, время контакта стопы с поверхностью проявляло тенденцию к сокращению на протяжении той же самой последовательности движений.

Средние величины горизонтальной скорости центра масс разгоняющих увеличивались почти в два с половиной раза, начиная с исходного положения на старте до момента отталкивания на стартовом блоке.

Дополнительное увеличение горизонтальной скорости более чем в полтора раза было зарегистрировано с момента отталкивания на блоке до отталкивания на 1-ом шаге.

После этого горизонтальная скорость центра масс имела тенденцию к небольшому увеличению вплоть до отталкивания на 4-ом шаге.

Средний угол наклона туловища разводящего был немного выше горизонтальной плоскости во время отталкивания на первом блоке. Ко времени отталкивания на 2-ом блоке наклон туловища увеличился почти на 25 градусов выше положения отталкивания на 1-ом блоке; затем при выполнении последующих четырех шагов величина угла наклона туловища слегка варьировала. Средние углы сгибания в коленном суставе были одинаковыми в положениях приземления и отталкивания во время первых трех шагов; их средние величины указывают на отсутствие полного разгибания ног в коленных суставах, во всех трех положениях приземления и отталкивания.

Не предполагалось обнаружить статистически значимую взаимозависимость между временем на старте и финише в связи с ограниченной информацией по данной теме в специальной литературе. Однако корреляция, выявленная в настоящем исследовании, была определена на основе комбинации результатов времени на старте и финише, зарегистрированных при проведении различных соревнований и испытаний. Единственная представляющая интерес статистически значимая корреляция была отмечена при проведении данного исследовательского анализа между временем стартового разгона и горизонтальной скоростью центра масс при отталкивании на 2-м шаге.

### Заключение

Результаты настоящего исследования указывают на чрезвычайную значимость стартового разгона как одного из факторов, определяющих результативность мужских двоек в соревнованиях по бобслею. Различия во времени стартового разгона послужили причиной почти 40% дисперсии результатов на финише. *Это свидетельствует о необходимости увеличения взрывной силы бобслеистов путем разработки соответствующих тренировочных программ, включающих упражнения с сопротивлением.*

Для выявления других кинематических переменных, которые влияют на сокращение времени стартового разгона, необходимо проведение дальнейших исследований.

*Если удастся научно обосновать корреляцию между временем стартового разгона и скоростью центра масс при отталкивании на 2-ом шаге, то это послужит еще одним веским аргументом в пользу необходимости проведения тренировок направленных на увеличение взрывной силы.*

1. Bruggemann, G.P., Morlock, M., & Zatsiorsky, V.M. (1997). Analysis of the bobsled and men's luge events at the XVII Olympic Winter Games in Lillehammer, *Journal of Applied Biomechanics*, 13, 98-108.
2. Leonardi, L.M., Komor, A., & Dal Monte, A. (1985). An interactive computer simulation of bobsled push-off phase with a multimember crew. In B. Jonsson (Ed.), *Biomechanics X* (pp. 761-766). Champaign, IL: Human Kinetics.
3. Morlock, M. & Zatsiorsky, V. (1989). Factors influencing performance in bobsledding: I: Influences of the bobsled crew and the environment. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, 208-221.

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ТЕСТ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЛАКТАТНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ РАЗБЕГЕ

*A laboratory test for the examination of alactic running performance*

*Armin Kibele<sup>1</sup> and David Behm<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> University of Kassel, Germany*

*<sup>2</sup> Memorial University of Newfoundland, Canada*

*(Journal of Sports Science and Medicine, – 2005, – № 4, pp 572-582)*

Максимальная работоспособность при выполнении заданий продолжительностью от 10 до 15 секунд в первую очередь зависит от потока энергии, вырабатываемой в процессе алактатного анаэробного метаболизма (Green, 1995; Hultman et al., 1967; Karlsson et al., 1972; Keul et al., 1981). Однако существуют значительные трудности при проведении соответствующих биохимических измерений.

В прошлом для оценки содержания АТФ и КрФ в мышечной ткани применялись биопсия мышц и компьютеризованные системы ядерного магнитного резонанса (McCully et al., 1988), а также упрощенные модели метаболизма (Garvie, 1981; Mader et al., 1981; Thomson and Serresse et al., 1988).

В отличие от этих дорогостоящих и инвазивных систем показатели работы и мощности в различных тестах на работоспособность рассчитываются посредством численной оценки алактатного анаэробного процесса энергоснабжения (см. Bouchard et al., 1991; Foster et al., 1995; Harman, 1995).

Было предложено, чтобы работа, выполняемая в течение определенного периода времени, использовалась для оценки эффективности системы энергоснабжения организма, и работа, совершаемая за единицу времени (что соответствует мощности) применялась в качестве оценки скорости потока энергии в системе энергоснабжения (Bouchard et al., 1991). Однако следует иметь в виду, что данные вели-

чины не имеют взаимно-однозначного соответствия по отношению только к одной алактатной анаэробной энергетической системе, а скорее относятся к совокупности всех остальных систем, функционирующих во взаимодействии с данной системой, которая, предположительно, производит большее количество энергии по сравнению с другими системами (Hill and Smith, 1989; Jacobs et al., 1983).

Даже если потребляются малые количества кислорода и концентрация лактата в мышцах только слегка повышена, тесты на оценку максимальной работоспособности свидетельствуют о ее алактатном характере, если исследуемые субъекты не могут выдерживать заданную интенсивность физической нагрузки более 10-20 секунд в связи с исчерпанием запасов фосфагенов в мышцах (Cerretelli, 1992; Gastin, 2001; Keul et al., 1981).

По причине близких к максимальному уровню интенсивности физической нагрузки проведение алактатных тестов в лабораторных условиях не требует значительной межмышечной координации и предполагает только простые виды двигательной активности. Подобные тесты первоначально выполнялись на стационарных велоэргометрах или изокинетических динамометрах (Bouchard et al., 1991; Green, 1995; Harman, 1995).

В литературе до сих пор освещалось мало исследований по применению тестов на оценку алактатной работоспособности при беге, поскольку для их проведения требуется мышечная активность близкая к максимальной. В настоящее время существует только две процедуры тестирования, позволяющие осуществлять оценку алактатной работоспособности при беге. В исследовании DalMonte и соавторов (1978) исследуемые субъекты должны были надавливать на силовую платформу, закрепленную на передних защитных поручнях беговой дорожки, при этом на протяжении всего теста устанавливалась очень низкая скорость беговой дорожки.

Используя показатели измерения силы в горизонтальной плоскости и скорости беговой дорожки, DalMonte et al. рассчитали среднюю мощность в течение 10-секундного периода тестирования. Поскольку исследуемые субъекты не могли преодолеть лактатный порог при заданной скорости беговой дорожки, близкая к максимальной мышечная активность достигалась путем приложения силы, близкой

к ее максимальному уровню. По причине низких требований к координации в тесте DalMonte et al. движения, требуемые от исследуемых субъектов, несколько отличались от движений характерных для бега, при котором требуется высокая частота движений.

В отличие от данных авторов Lakomy (1984; 1987) была предложена процедура лабораторного тестирования, при которой исследуемые субъекты бежали со скоростью, близкой к максимальной. Этот исследователь применял маленький электрический генератор, закрепленный на руле беговой дорожки и соединенный с динамометрическим датчиком, который фиксировался выше пояса на спине исследуемого субъекта для оценки горизонтальной тяговой мощности во время спринтерского бега по немоторизованной беговой дорожке.

Таким образом, полотно беговой дорожки приводилось в движение самим исследуемым субъектом. Чтобы предотвратить развитие горизонтального ускорения исследуемым субъектом, ремень, соединяющий руль с динамометрическим датчиком, оказывал горизонтальную силу на бегуна, равную по величине и противоположную по направлению силе ленты беговой дорожки под ногами бегуна.

Горизонтальная выходная мощность рассчитывалась как произведение показателей силы, регистрируемых динамометрическим датчиком, и скорости движения беговой дорожки. Однако в данной публикации не указано, насколько легко бегунам удавалось приобрести навыки, необходимые для правильного выполнения теста. Кроме того, эта задача может считаться соответствующей достижению максимальной скорости в забеге на 100 м, когда бегун уже ускорился до максимального предела. В то время как процедура тестирования, предложенная DalMonte и соавторами, предусматривала низкую частоту движений и высокую величину прилагаемого усилия, для теста Lakomy применялись противоположные по величине показатели. В настоящей статье описывается тест на алактатную работоспособность при беге с заранее установленными требованиями к скорости бега и приложению силы.

**Цель данного исследования** заключается в получении фактических свидетельств о корреляции между результатами BST (Bob Start Test – тест старта боба) и других тестов на кратковременную работоспособность.

Для получения фактического материала конструктивной достоверности основанные на физиологических адаптационных реакциях показатели BST должны коррелировать с показателями максимальной силы (Schmidtbleicher, 1985), алактатной мощности (Margaria, 1966) и ёмкости алактатной анаэробной системы энергообеспечения (алактатной емкости).

В целях доказательства предполагаемого соответствия алактатной емкости использовалась метаболическая модель Mader et al. (1981). Дисперсия показателей BST может быть объяснена дисперсией оценок силы ног, алактатной мощности и алактатной емкости.

Для исследования предполагаемых взаимосвязей применяется множественный регрессионный анализ. Короче говоря, вместо выражения внешней валидности теста посредством сравнения значений механической мощности и выполняемой во время теста работы был использован корреляционный анализ для получения доказательств конструктивной достоверности (Baumgartner et al., 2003; Thomas and Nelson, 2001) применяемой процедуры тестирования.

## Методы

В исследованиях принимали участие десять студентов мужского пола, специализировавшихся в области спортивной науки, и пять студентов, изучавших другие дисциплины. Все участники были студентами Фрайбургского университета (Германия), (возраст:  $27,7 \pm 4,1$  лет, рост:  $1,82 \pm 0,46$  м, масса тела:  $78,3 \pm 6,7$  кг). Они занимались различными видами спорта, по крайней мере, два раза в неделю, но не принимали участие в соревнованиях.

Тесты проводились в разные дни во избежание влияния усталости обследуемых на их результаты. Все процедуры тестирования были выполнены в течение 20 дней.

### Тест старта боба

Тест старта боба может проводиться после внесения незначительной модификации в электрическое соединение обычной беговой дорожки путем инвертирования полярности мотора. Выполнение

данного задания напоминает процедуру толкания небольшого автомобиля в попытке завести мотор без стартера.

Этот тест отличается высокой эффективностью при исследовании результативности бобслеистов на старте (рис. 1). Отсюда его название – тест старта боба – bob start test (BST). В то время как для выполнения данного теста требуются более высокие скорости, чем в тесте DalMonte et al., в нем предъявляются гораздо меньшие требования к координации по сравнению с тестом Lakomy. На проведение теста BST затрачивается 10 секунд – время, достаточное для того, чтобы обеспечить выработку максимального количества энергии в процессе алактатного анаэробного метаболизма, которое необходимо для выполнения требуемой работы.

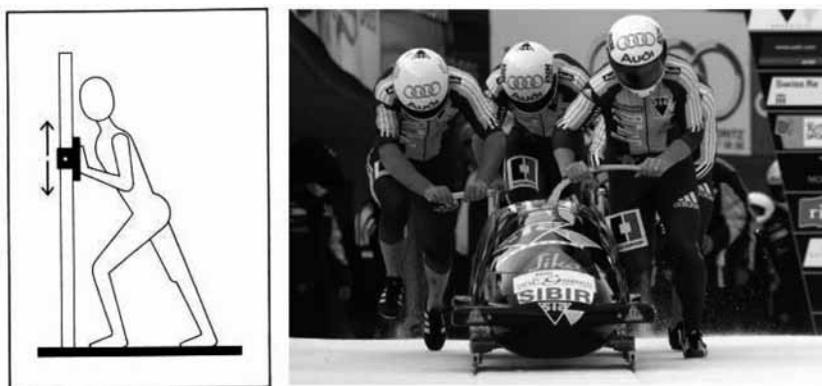


Рисунок 1. Слева: положение тела при выполнении теста старта боба (BST).

Справа: фотография старта команды пилота мирового класса Мартина Аннена (этап кубка мира по бобслею в Кортине-д'Ампеццо, 19 декабря, 2004 г.)

В наших исследованиях для проведения теста BST использовалась широко применяемая беговая дорожка (Woodway S1-25 м/с, Weil, Germany). Полярность источника тока инвертировалась в целях обеспечения функционирования мотора как тормоза, а не как акселератора движения ленты беговой дорожки. На дорожке был установлен потенциометр, предназначенный для регулирования силы сопротивления мотора. В результате ускорения движения ленты развиваются горизон-

тальные силы, преодолевающие данную силу сопротивления. В серии предварительных испытаний оценивалась общая сила сопротивления в пределах от 90 до 150 Н в целях определения показателя данной силы, обеспечивающего достижение усталости примерно через 10 секунд при сохранении близкой к нормальной биомеханики бега.

Было обнаружено, что данные условия выполнялись при силе сопротивления 134 Н. Были проведены дополнительные тесты в целях получения доказательств того, что различия в весе тела и скорости движения дорожки не будут влиять на силу сопротивления. В данных тестах применялся мотор с электронным управлением (модель: MT3-OU4 48 by EAT, Freiburg, Germany) для сообщения горизонтальной тяги (тип преобразователей: U2A-1000кг by Hottinger-Baldwin, Darmstadt, Germany) ленте беговой дорожки.

Для имитации скоростей бега применялись различные скорости движения тягового механизма и грузы гантелей (65 до 85 кг). При проведении данных тестов не было выявлено систематического воздействия веса или скорости беговой дорожки на силу тяги по причине очень эффективной и почти не создающей трения конструкции беговой дорожки Woodway. Максимальная разница в горизонтальной силе между различными настройками составляла 2,9 Н (< 1,7 % от заданной силы сопротивления).

При выполнении теста BST применялась следующая процедура проведения испытаний. Вначале обследуемые должны были интенсивно размяться. После разминки передний опорный стержень поручней беговой дорожки регулировался в соответствии с ростом участников исследования таким образом, чтобы они могли надавливать на опору на высоте груди (рис. 1).

Кроме того, было отмечено место первого контакта ступней ног на корпусе беговой дорожки рядом с лентой. Величина подъема переднего опорного стержня и указатели мест для стоп устанавливались в соответствии с ростом каждого участника, так что направление результирующей силы реакции было одинаковым для всех исследуемых субъектов. Верхние части рук были прижаты к туловищу, в то время как кисти располагались на опорном стержне на высоте груди. В начале выполнения теста исследуемый субъект находился в требуемом положении покоя, показанном на рисунке 1. Перед тестированием всем

участникам эксперимента было предоставлено достаточно времени для того, чтобы потренироваться в выполнении поставленной задачи. После предупреждающего голосового сигнала экспериментатора выполнение теста начиналось с момента гудка компьютерной программы для аналитических исследований. Интерфейс аналого-цифрового преобразователя (DT2821 – DATA Translation, USA) применялся для записи сигнала скорости от беговой дорожки (частота: 50 Гц). Тест продолжался в течение 10 секунд и также завершался компьютерным звуковым сигналом. Было организовано три повтора теста с интервалами на отдых от 10 до 15 мин. Лучший результат испытаний использовался для последующего статистического анализа. Критерием теста служило расстояние, преодолеваемое в течение 10-секундного периода тестирования (BST10). Кроме того, расстояние, пробегаемое за последние 3 секунды (BST03) оценивалось в качестве индикатора усталости. Показатели расстояния рассчитывались с помощью процедуры интеграции (формулы трапеций) значений скорости беговой дорожки.

### **Тест на силу разгибания ног**

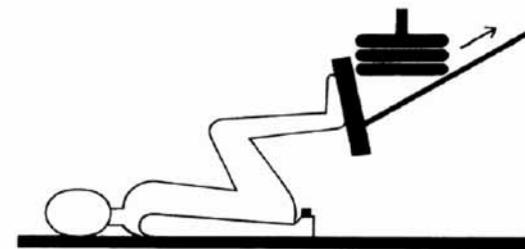
Исследование силы разгибания ног проводилось с применением специального аппарата – ножного пресса, разработанного во Фрайбургском университете (рис. 2). Руководство по проведению тестирования описано в публикации Schmidtbleicher (1985).

В целях оценки максимальной силы было определено максимальное изометрическое сокращение мышц каждой ноги по отдельности. Для каждой ноги выполнялось три теста.

После выполнения разминки и упражнений на растяжку обследуемые принимали удобное положение, лежа на спине с согнутой ногой, так что углы в тазобедренном и коленном суставах составляли примерно 80 градусов (рис. 2).

После сигнала от экспериментатора исследуемые субъекты должны были выполнить резкое разгибание ноги взрывного типа, прилагая при этом максимальное усилие.

Для статистического анализа использовался наивысший показатель максимальной силы, показанный при проведении трех тестов.



*Рисунок 2. Ножной пресс для анализа силы разгибания ног (в опорную платформу вмонтированы линейные датчики фирмы «Kistler»)*

Для анализа достоверности учитывались показатели всех трех тестов. Для анализа силовых показателей потребовалось применение отдельных силовых платформ для левой и правой ноги с четырьмя датчиками силы, вмонтированными в каждый угол платформы (Kistler, Winthertur, Switzerland).

Силовые сигналы регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя (DT2821 – DATA Translation, USA), функционирующего при 100 Гц частоты на входе. На основе полученных показателей максимальной силы была проведена оценка максимальной амплитуды кривых результирующей силы-времени. Сумма показателей максимальной силы правой и левой ноги использовалась для последующего проведения статистического анализа.

### **Тест бега по ступенькам Margaria**

Тест бега по ступенькам Margaria (MST) считается классической процедурой тестирования, применяемой для исследования алактатной мощности нижних конечностей (Bouchard et al., 1991; Harman, 1995).

Этот тест был разработан Margaria et al. (1966) и продемонстрировал высокую степень корреляции с алактатным энергоснабжением.

При проведении данного исследования использовался вариант теста бега по ступенькам Margaria, предложенный Kalamen (1968) и описанный Fox и соавторами (1988). В данной модификации ис-

ходного теста обследуемых просили взбежать вверх по лестнице с расстояния 6 м. Задание заключалось в беге через три ступеньки с максимально возможной скоростью. При этом на третьей и девятой ступеньке закреплялись коврики в целях регистрации времени, необходимого для подъема массы тела между этими ступеньками на высоту 1,05 м. Было выполнено три повтора теста, и рассчитана мощность с применением следующей формулы:

$$MST = m \cdot g \cdot h / T \quad (1)$$

где:

- MST – мощность при выполнении теста бега по ступенькам Margaria;
- m – масса тела;
- g – гравитационная постоянная;
- h – измеренная высота подъема (= 1,05 метров);
- T – время, необходимое для подъема массы тела с третьей до девятой ступеньки.

Тестирование проводилось следующим образом: после тщательного выполнения разминки и упражнений на растяжку обследуемым предлагали попрактиковаться в разбеге и взбегании вверх по ступенькам, чтобы они испытывали большую уверенность во время проведения теста.

Для выполнения анализа достоверности было предусмотрено три повтора теста. Для последующих статистических анализов учитывались результаты лучших попыток.

### ***Алактатная емкость, оцениваемая с применением модели метаболизма***

В прошлом исследователи применяли различные модели метаболизма для оценки алактатной емкости (Garvie, 1981; Mader et al., 1981; Thomson and Serresse et al., 1988). В данном исследовании для достижения этой цели была адаптирована модель Mader et al. (1981).

Основная идея применения данной модели заключалась в исследовании энергетической структуры бега по беговой дорожке, вы-

полняемого до состояния изнеможения, для которого была известна общая потребность в энергии, а метаболические субкомпоненты анаэробной лактатной и аэробной систем оценивались посредством измерений. Поскольку интенсивность бега была ограниченной по причине координационных требований, предъявляемых к бегу по беговой дорожке, необходимо было выбрать скорость и продолжительность бега, обеспечивающие практически максимальное истощение алактатного и лактатного энергообеспечения, которые могли быть достигнуты в рамках выполнения данного теста.

Были проведены предварительные испытания в целях выявления максимальных индивидуальных скоростей бега, которые обследуемые могут поддерживать в течение примерно 60 секунд. Считается, что данная интенсивность работы истощает алактатное энергообеспечение (Cheetham et al., 1986; Karlsson et al., 1975; Katz et al., 1986; Sahlin, 1986; Withers et al., 1991) и позволяет оценить максимальную емкость гликолитического метаболизма.

Каждым участником эксперимента были выполнены один предварительный тест на беговой дорожке в полевых условиях и два предварительных теста на беговой дорожке – тренажере в целях выявления их индивидуальной максимальной скорости, которую они способны поддерживать в течение 60-секундного бега по беговой дорожке (тренажеру).

Для данной скорости бега были рассчитаны энергетические потребности (выражаемые в кислородных эквивалентах (КЭ)) с применением метода, предложенного Mader et al. (1981):

$$VO_2 \text{ (мл/кг/мин)} = 20 + 0,8 \cdot v, 35 \quad (2)$$

(v = скорость бега в м/с)

Эта формула была выведена Mader и соавторами на основе предварительных данных других исследователей (Cavagna et al., 1965; Pugh, 1970; Saltin, 1967) и позволяет оценить общее количество энергии на единицу массы тела (кг), которое необходимо для выполнения бега с заданной скоростью (мл КЭ/кг).

Для оценки алактатной емкости из общего количества энергетических потребностей следует вычесть энергетические фракции, про-

изводство которых осуществляется кислородной и лактатной системами (рис. 3).

Измеряя потребление кислорода с применением системы «Oxcon Sigma» (Mijnhardt, Netherlands), использовались максимальные показатели концентрации лактата в крови для оценки лактатного метаболизма, и при этом были переведены показатели лактата в кислородные эквиваленты (КЭ). При проведении данных исследований применялся коэффициент пересчёта, равный 2,9 мл O<sub>2</sub> на кг массы тела на 1 ммоль/л лактата, который был определен Margaria и соавторами (1966).

60-секундный тест до достижения состояния изнеможения выполнялся на моторизированной беговой дорожке (Woodway, Model Weil, Germany) сотрудниками Факультета профилактической и реабилитационной спортивной медицины в больнице Фрайбургского университета. После интенсивной разминки и упражнений на растяжку обследуемые выполняли в течение двух минут разогревающий бег со скоростью 8 км/ч.



Расчет энергетических потребностей: VO <sub>2</sub> (мл/кг/мин) = 20 + 0,8 v <sup>2,35</sup>		
Алактатная система:	Лактатная система:	Кислородная система:
рассчитывается	1 ммоль/л лактата = 2,9 мл/кг O <sub>2</sub>	измеряемое потребление

Рисунок 3. Модель метаболизма для оценки алактатной емкости  
Алактатная емкость = энергетические потребности – (минус)  
энергообеспечение посредством лактатной системы – энергообеспечение  
посредством кислородной системы (мл КЭ)

Последние 10 секунд считались в обратном порядке перед продолжающимся в течение 3 секунд ускорением беговой дорожки в соответствии с индивидуальной скоростью бега каждого субъекта. В конце бега участников эксперимента попросили постоять на поверхности беговой дорожки в течение одной минуты, чтобы взять пробы

капиллярной крови из мочки уха, а также выполнить анализ их постангагрузочного потребления кислорода. В течение следующей минуты обследуемые выполняли (по заданию) бег по беговой дорожке при очень низкой скорости. Затем их попросили посидеть еще 20 минут для проведения остальных измерений.

Во время бега измерялось потребление кислорода с применением системы «Oxcon Sigma» в режиме смесительной камеры. Показатели потребления кислорода регистрировались в течение одной минуты по окончании бега в целях исследования раннего компонента избыточного постангагрузочного потребления кислорода (рИППК) как косвенного показателя ресинтеза фосфагенов или, иными словами, алактатной емкости (Bangsbo et al., 1990; DiPrampiero and Margaria 1968; Piiper et al., 1968).

В прошлом вместо термина ИППК (недавний обзор Boersheim and Bahr, 2003) применялся термин «кислородный долг», обозначающий непрерывный подъем потребления кислорода после физической нагрузки и предложенный более ранними специалистами в области физиологии мышечной системы, такими как Hill (1924) или Margaria и соавторы (1933). Позднее термин «кислородный долг» был подвергнут критическому рассмотрению (Brooks 1971; 1991; Gaesser and Brooks, 1984), и было принято решение о более предпочтительном применении современного термина ИППК. Логическое обоснование наших измерений основано на предложенном полупериоде данного раннего компонента ИППК, равном 30 сек. (DiPrampiero and Ferretti, 1999; Margaria et al., 1933).

Частота отбора проб для проведения газового анализа была установлена в количестве 200 циклов в секунду (с разрешением 12 бит), при этом пробы O<sub>2</sub> исследовались с применением парамагнитного анализатора при корректировке параметров времени дыхания, температуры и барометрического давления. В целях корректировки потребления кислорода во время фазы бега в соответствии с временной задержкой (Hughson and Morrissey, 1982) в кинетике потребления кислорода на стадии разминки средний показатель уровня потребления кислорода во время разминки вычитался из каждого результата измерения, проводимого во время бега в рамках выполнения теста.

Для анализа максимальной концентрации лактата в крови образцы крови отбирались через 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 и 30 минут после бега. Данные пробы на лактат замораживались и позднее подвергались анализу с применением фотометрической системы (Boehringer, Germany). Соответствующие показатели лактата были внесены в алгоритм нелинейной аппроксимации (процедура: нелинейная регрессия в программе SPSS-V12.0) в целях выявления максимума подобранной функции  $F(t)=a_1 \cdot (1-\exp(-k_1 \cdot t))+a_2 \cdot (1-\exp(-k_2 \cdot t))+a_0$ .

Эта функция относится к модели метаболических компартментов, разработанной Freund and Zouloumian (Freund and Zouloumian, 1981; Zouloumian and Freund, 1981).

Для расчета алактатной емкости показатели концентрации лактата в крови, измеренные после разминки, вычитались из максимальных показателей, полученных после бега до достижения состояния изнеможения. И, наконец, потребление кислорода во время выполнения теста, а также кислородные эквиваленты для максимальной концентрации лактата в крови вычитались из показателя общих энергетических потребностей, полученного на основе формулы Мадера и соавторов (Mader et al., 1981).

Полученный показатель был использован в качестве оценки алактатной емкости при беге (мл КЭ). Как и ранее, для расчета концентрации креатинфосфата (КрФ) в рабочих мышцах применялся переводной коэффициент.

Кислородный эквивалент, равный 3,94 мл на ммоль КрФ, использовался для расчетной мышечной массы, равной 44% от общей массы тела, при этом 80% последнего расходовалось в процессе бега (Mader et al., 1981). Из вычисленного КЭ вычиталось 6 мл  $O_2$  на 1 кг мышечной массы для учета внутримышечных запасов  $O_2$  (Jansson and Sylven, 1981). При дальнейшем анализе этот показатель применялся в качестве модельного показателя алактатной емкости (АЕ).

Для описательной статистики рассчитывались средние показатели и стандартные отклонения. Для определения нормальности распределения полученных при выполнении тестов данных применялась оценка асимметрии и эксцесса эмпирического распределения (Easy-Stat: Müller and Schweizer, Freiburg Germany). Коэффициенты внутригрупповой корреляции (rIC) рассчитывались в целях опреде-

ления достоверности показателей тестов, выполняемых при проведении настоящего исследования.

Для этой цели осуществлялся анализ данных трех повторов. Лучшие показатели данных трех повторов применялись для извлечения статистических выводов на основе коэффициентов корреляции Пирсона (r). Были рассчитаны коэффициенты множественной корреляции (R) с применением программы SPSS-V12.0 в целях количественного определения объяснимой дисперсии критериев на основе дисперсии показателей силы ног, алактатной мощности и алактатной емкости в тесте BST (тесте старта боба).

## Результаты

Все результаты измерений отличались нормальным распределением в пределах исследуемой выборки. Среднегрупповой показатель для теста BST10 в лучших повторах составил  $35,4 \pm 2,6$  м, что соответствует средней скорости бега  $3,52 \pm 0,25$  м/с. Коэффициенты внутригрупповой корреляции (rIC= 0,93 для BST10 и rIC = 0,91 для BST03) продемонстрировали высокую степень достоверности полученных данных. Среднегрупповой показатель максимального уровня силы был равен для правой ноги  $1161 \pm 179$  Н (коэффициент внутригрупповой корреляции: rIC= 0,97) и для левой ноги  $1144 \pm 186$  Н (коэффициент внутригрупповой корреляции: rIC = 0,95).

Для статистического анализа применялась сумма показателей максимальной силы разгибания (MCP) для правой и левой ноги (среднегрупповой показатель MCP:  $2304 \pm 351$  Н). Для теста MST (тест бега по ступенькам Margaria) среднегрупповой показатель времени между третьей и девятой ступеньками составил  $469 \pm 28$  мсек для лучших повторов, что позволило получить расчетную мощность, равную  $1691 \pm 171$  Ватт. Анализ достоверности продемонстрировал присутствие внутригрупповой корреляции (rIC = 0,95).

При проведении 60-секундного теста бега до состояния изнеможения («до отказа») среднегрупповой показатель общего потребления кислорода составил  $3592 \pm 490$  мл. Это соответствовало  $45,9$  мл/кг/мин. Для косвенной оценки ресинтеза фосфагенов применялся ранний компонент избыточного построгодового потребления кислорода

(рИППК), связанный с ресинтезом фосфата, среднее значение которого достигало  $2662 \pm 315$  мл. Среднегрупповой показатель максимальной концентрации лактата составил  $12,6 \pm 1,5$  ммоль/л.

Среднегрупповой показатель алактатной емкости в кислородных эквивалентах был равен  $2892 \pm 525$  мл  $O_2$ . На основе данного показателя была рассчитана концентрация КрФ, равная  $26,6 \pm 3,7$  ммоль/кг мокрой мышечной массы, которая после корректировки с учетом запасов  $O_2$  в мышечной ткани составила  $25,0 \pm 3,7$  ммоль КрФ/кг мокрой мышечной массы.

Тесты, позволяющие выводить статистические заключения, послужили главным инструментом для демонстрации достоверности нового лабораторного теста на алактатную работоспособность при беге. В таблице 1 представлены коэффициенты корреляции Пирсона между тестом старта боба (BST10), тестом на силу разгибания ног (LES), тестом бега по ступенькам Маргариа (MST) и тестом на оценку лактатной емкости (AC).

Уровень значимости тестирования при отклонении от нулевой гипотезы в обоих направлениях для размера выборки  $N = 15$  составил  $r = 0,51$  при  $p = 0,05$  и  $r = 0,63$  при  $p = 0,01$ . Значимые и высокозначимые коэффициенты корреляции были обнаружены между тестами BST10, MST, AC и eEPOC (рИППК – ранний компонент избыточного постнагрузочного потребления кислорода). Еще более высокий уровень корреляции был выявлен между тестами BST03 и MST ( $r = 0,85$ ;  $p < 0,01$ ), с одной стороны, и AC ( $r = 0,90$ ;  $p < 0,01$ ), с другой стороны.

Коэффициент корреляции между BST10 и LES был признан незначимым ( $r = 0,41$ ,  $p > 0,05$ ). В то же время значимая корреляция была обнаружена между тестом на силу ног и тестом бега по ступенькам Маргариа. Так же была установлена корреляция между результатами теста Маргариа, мерой алактатной емкости (мл КЭ) и ранним компонентом ИППК.

Таблица 1. Коэффициенты двумерной корреляции для теста старта боба (BST10), теста на силу разгибания ног (LES), теста бега по ступенькам Маргариа (MST), ранним компонентом избыточного постнагрузочного потребления кислорода (eEPOC) и тестом на оценку лактатной емкости (AC)

	BST10	LES	MST	eEPOC
LES	.41	-	-	-
MST	.77**	.71**	-	-
eEPOC	.61*	.28	.59*	-
AC	.79**	.31	.80**	.52*

\*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , для тестирования при отклонении от нулевой гипотезы в обоих направлениях

Множественные корреляции между значением критерия и двумя или более предикторами не приводили к значительному повышению процента объяснимой дисперсии по сравнению с достигнутым путем применения одного только предиктора.

Наиболее высокая множественная корреляция –  $R = 0,83$  была обнаружена между тестом BST10 и комбинацией тестов MST плюс AC, при этом доля объяснимой дисперсии критерия составила 68 % (63% после коррекции с учетом множественных предикторов). Для теста BST03 был определен коэффициент множественной корреляции  $R = 0,93$  при 86% объяснимой дисперсии критерия (84 % после коррекции с учетом множественных предикторов).

## Выводы

Обобщая вышесказанное, на основе результатов настоящего исследования можно сделать вывод, что *применение теста старта боба может послужить эффективной альтернативой использованию всех остальных процедур тестирования алактатной работоспособности, в частности алактатной работоспособности во время бега.*

Результаты выполнения данного теста продемонстрировали хорошую корреляцию с результатами других тестов на определение алактатной емкости и алактатной мощности. Кроме того, спортсмены и тренеры могут легко интерпретировать результаты тестирования, основанные на простом измерении расстояния.

1. Bangsbo, J., Gollnick, P.D. and Graham, T.E. (1990) Anaerobic energy production and O<sub>2</sub> deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *Journal of Physiology* 422, 539-559.
2. Baumgartner, T.A., Jackson, A.S., Mahar, M.T. and Rowe, D.A. (2003) Measurement for evaluation in physical education & exercise science. 7th edition.
3. McGraw Hill, Boston. Boersheim, E. and Bahr, R. (2003) Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. *Sports Medicine* 33, 1037-1060.
4. Bouchard, C., Taylor, A.W., Simoneau, J.A. and Dulac, S. (1991) Testing anaerobic power and capacity. In: *Physiological testing of the high-performance athlete*. Eds: MacDougal, J.D., Wenger, H.A. and Green, H.J. 2nd edition. Champaign: Human Kinetics. 175-221.
5. Brooks, G.A. (1971) Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions and oxygen debt. *American Journal of Physiology* 220, 1053-1059.
6. Brooks, G.A. (1991) Current concepts of lactate exchange. *Medicine and Science in Sports & Exercise* 23, 895-906.
7. Cavagna, G.A., Margaria, R. and Arcelli, E. (1965) A high-speed motion picture analysis of the work performed in sprint running. *Research Film* 5, 309.
8. Cerretelli, P. (1992). Energy sources for muscular exercise. *International Journal of Sports Medicine* 13 (Suppl.), 106-110.
9. Cheatham, M.E., Boobis, L.H., Brooks, S. and Williams, C. (1986) Human muscle metabolism during sprint running. *Journal of Applied Physiology* 61, 54-60.
10. DalMonte, A., Leonardi, L.M. and Sardella, F. (1978) The measure of maximum anaerobic alactacid power in different kinds of sports. XXI. FIMS World Congress, Sep. 1978, Brasilia – DF, 7-12.
11. Davies, C.T.M., DiPrampo, P.E. and Cerretelli, P. (1972) Kinetics of cardiac output and respiratory gas exchange during exercise and recovery. *Journal of Applied Physiology* 32, 618-625.
12. DiPrampo, P.E. and Margaria, R. (1968) Relationship between O<sub>2</sub>-consumption, high-energy phosphate and the kinetics of O<sub>2</sub>-debt in exercise. *Archives Ges. Physiology* 304, 11-19.
13. DiPrampo, P.E., Davies, C.T.M., Cerretelli, P. and Margaria, R. (1970) An analysis of O<sub>2</sub> debt contracted in submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology* 29, 547-551.
14. DiPrampo, P.E. and Ferretti, G. (1999) The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiratory Physiology* 118, 103-115.
15. Foster, C., Hector, L.L., McDonald, K.S. and Snyder, A.C. (1995) Measurement of anaerobic power and capacity. In: *Physiological assessment of human fitness*. Eds: Maud, P.J. and Foster, C. Champaign: Human Kinetics. 73-85.
16. Fox, E.L. Bowers, R.W. and Foss, M.L. (1988) *The physiological basis of physical education and athletes*. Lea-Febinger, Philadelphia
17. Freund, H. and Zouloumian, P. (1981) Lactate after exercise in man: I. Evolution kinetics in arterial blood. *European Journal of Applied Physiology* 46, 121-133.
18. Gaesser, G.A. and Brooks, G.A. (1984) Metabolic bases of excess postexercise oxygen consumption: a review. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 16, 29-43.
19. Gatin, P.B. (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine* 31, 725-41.
20. Green, S. (1995) Measurement of anaerobic work capacities in humans. *Sports Medicine* 19, 32-42.
21. Harman, E.A. (1995) The measurement of human mechanical power. In: *Physiological assessment of human fitness*. Eds: Maud, P.J. and Foster, C. Champaign: Human Kinetics. 87-113 .
22. Hill, A.V. (1924) Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Proceedings of the Royal Society* 96, 438-455.
23. Hill, D.W. and Smith, J.C. (1989) Oxygen uptake during the Wingate anaerobic test. *Canadian Journal of Sport Sciences* 14, 122-125.
24. Hill, D.W. and Smith, J.C. (1992) Calculation of aerobic contribution during high intensity exercise. *Research Quarterly* 63, 85-88.
25. Hughson, R.L. and Morrissey, M. (1982) Delayed kinetics of respiratory gas exchange in the transition from prior exercise. *Journal of Applied Physiology* 52, 921-929.
26. Hultman, E., Bergström, J. and McLennon-Andersen, N. (1967) Breakdown and resynthesis of phosphocreatine and adenosinetriphosphate in connection with muscular work in man. *Scandinavian Journal Laboratory Investigations* 19, 56-66.

27. Jacobs, I., Tesch, P.A., Bar-Or, O., Karlsson, J. and Dotan, R. (1983) Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30s of supramaximal exercise. *Journal of Applied Physiology* 55, 365-367.
28. Jansson, E. and Sylvén, C. (1981) Myoglobin and fiber types in human skeletal muscle (Abstract). *Acta Physiologica Scandinavica* 112, 12A Kalamen, J. (1968) Measurement of maximum muscular power in man. Doctoral thesis, Ohio State University
29. Karlsson, J., Nordesjö, L.O., Jorfeldt, L. and Saltin, B. (1972) Muscle lactate, ATP, and CP levels during exercise after physical training in man. *Journal of Applied Physiology* 33, 199-203.
30. Karlsson, J., Funderburk, C.F., Essen, B. and Lind, A.R. (1975) Constituents of human muscle in isometric fatigue. *Journal of Applied Physiology* 38, 208-211.
31. Katz, A., Sahlin, K. and Hendriksson, J. (1986) Muscle ATP turnover rate during isometric contraction in humans. *Journal of Applied Physiology* 60, 1839-1842.
32. Keul, J., Dickhuth, H.H., Berg, A. and Huber, G. (1981) Allgemeine und sportartspezifische
33. Leistungsdiagnostik im Hochleistungsbereich. *Leistungssport* 11, 382-396. (in German). Lakomy, H. (1984) An ergometer for measuring the power generated during sprinting. *Journal of Physiology* 354, 33P.
34. Lakomy, H. (1987) Measurement of human power output in high intensity exercise. In: *Current research in sports biomechanics*. Eds: Van Gheluwe, B. and Atha, J. Basel: Karger. 46-57.
35. Luechtenberg, D. (1982) Das Verhalten des Energiestoffwechsels bei kurzfristigen Belastungen. *Die Lehre der Leichtathletik* 33, 479-482. (In German).
36. Mader, A., Heck, H. and Hollmann, W. (1981) Leistung und Leistungsbegrenzung des menschlichen Organismus, interpretiert am Modell thermodynamisch offener Systeme. Ein Beitrag zur Diskussion biologischer Leistungsgrenzen im Hochleistungssport. In: *Sport an der Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit*. Ed: Rieckert, H. Berlin, 69-93. (In German).
37. Margaria, R., Edwards, H.T.M. and Dill, D.B. (1933) The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *American Journal of Physiology* 106, 689-715.
38. Margaria, R., Magili, F., Cuttica, F. and Cerretelli, P. (1965) The kinetics of oxygen consumption at the onset of muscular exercise in man. *Ergonomics* 8, 49-54.
39. Margaria, R., Aghemo, P. and Rovelli, E. (1966) Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *Journal of Applied Physiology* 21, 1662-1664.
40. McCully, K.K., Kent, J.A. and Chance, B. (1988) Application of <sup>31</sup>P Magnetic Resonance spectroscopy to the study of athletic performance. *Sports Medicine* 5, 232-241.
41. Morton, R.H. (1987) Delayed or accelerated oxygen uptake kinetics in the transition from prior exercise? *Journal of Applied Physiology* 62, 844-846.
42. Mueller, K.-J. (1987) Statische und dynamische Muskelkraft. Deutsch, Frankfurt. (In German).
43. Piiper, J., DiPrampo, P.E. and Cerretelli, P. (1968) Oxygen debt and high energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog. *American Journal of Physiology* 215, 523-531.
44. Pugh, L.G.C.E. (1970) Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *Journal of Physiology* 207, 823.
45. Sahlin, K. (1986) Muscle fatigue and lactic acid accumulation. *Acta Physiologica Scandinavica* 128 (Suppl. 556), 83-91.
46. Saltin, B. (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology* 23, 353
- Schmidtbleicher, D. (1985) Strength training: part 2: structural analysis of motor strength qualities and its application to training. *Science Periodical on Research & Technology in Sport (Physical Training/Strength)* W4, 1-10.
47. Serresse, O., Lortie, G., Bouchard, C. and Boulay, M.R. (1988) Estimation on the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. *International Journal of Sports Medicine* 9, 456-460.
48. Thomas, J.R. and Nelson, J.K. (2001). *Research methods in physical activity*. 4th edition. Human Kinetics, Champaign.
49. Thomson, J.M. and Garvie, K.J. (1981) A laboratory method for determination of anaerobic energy expenditure during sprinting. *Canadian Journal Applied Sport Science* 6, 21-26.
50. Withers, R.T., Sherman, W.M., Clark, D.G., Esselbach, P.C., Nolan, S.R., MacKay, M.H. and Brinkman, M. (1991) Muscle metabolism during 30, 60, and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *European Journal of Applied Physiology* 62, 354-362.
51. Zouloumian, P. and Freund, H. (1981) Lactate after exercise in man: III. Properties of the compartment model. *European Journal of Applied Physiology* 46, 149-160.

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СКОЛЬЖЕНИЯ ПОЛОЗЬЕВ ОДИНОЧНЫХ САНЕЙ (ТОБОГГАНА) ПО ЛЬДУ

*Analysis and Optimization of the Sliding Properties of Luge Steel Blades on Ice*  
Mathieu Fauve and Hansueli Rhyner  
(*The Engineering of Sport 7, 2008, – Vol, – pp 579-586*)

На результативность саночников-одиночек оказывают влияние уровень их спортивного мастерства, аэродинамические характеристики и взаимодействие между полозьями саней и льдом. Это взаимодействие обуславливает такие параметры, как величина силы трения и глубина проникновения полозьев внутрь льда, которые определяют характеристики скольжения и эффективность управления санями. Для достижения минимального трения при одновременном обеспечении надлежащего контроля саней спортсмены пытаются приспособить их характеристики к условиям льда путем изменения продольного изгиба и размера поперечного сечения стальных полозьев.

Сложность в обнаружении оптимальных геометрических характеристик заключается в том, что действующая на лед сила варьирует примерно от 1200 Н на прямых участках до 6000 Н на виражах. Одна из главных проблем также состоит в том, что оптимизация оборудования осуществляется на основании субъективных полевых испытаний, на результаты которых могут оказывать влияние многочисленные параметры, такие как неоднородная ледовая поверхность или ошибки в управлении санями.

Скольжение полозьев по льду изучалось авторами многих научных работ (Bowden [B1], Ericksson [E1], Barnes et al. [BT1], Colbeck et al. [CN1], Hainzmaier [H1]). В многочисленных исследованиях были описаны различные физические процессы, возникающие во время скольжения по ледяной поверхности (Evans [EN1], Oksanen et

al. [OK1], Akkok et al. [AE1], Petrenko [P1], Petrenko et al. [PC1, PR1], Hainzmaier [H1]).

Было доказано, что на скольжение полозьев по льду влияют такие факторы, как нагрев от трения, таяние льда под давлением, пропахивание поверхности, присутствие жидкообразного слоя, электризация и «схватывание» при трении (прилипание, сцепление с поверхностью). При проведении количественных измерений главным образом в лабораторных условиях исследовалось также влияние многих других параметров, включая материал изготовления полозьев, температуру льда или изменение трения в зависимости от нагрузки, (Bowden [B1], Ericksson [E1], Evans et al. [EN1], Tusima [T1], Forland et al. [FT1], Akkok et al. [AE1], Itakaki et al. [IH1], Hainzmaier [H1]).

Эффективность управления полозьями никогда не подвергалась научным исследованиям. Однако можно предположить, что она будет иметь высокую степень корреляции с глубиной проникновения полозьев в лед.

В 2005 году Hainzmaier [H1], применяя гипсовый материал, проанализировал следы, оставляемые полозьями боба на поверхности льда, и сопоставил результаты своих измерений с данными цифрового моделирования.

Механические свойства льда изучались многими авторами (Bowden [B1], Petrenko et al. [PW1], Schulson [S1], Petrovic [P2]). При этом было продемонстрировано, что на твердость льда и его сопротивление сжатию (прочность на сжатие) большое влияние оказывает температура.

В связи с отсутствием аналогичных исследований в прошлом и по причине их важности для повышения результативности саночников-одиночек **данная работа была посвящена** изучению взаимодействия между глубиной проникновения и трением полозьев саней при скольжении по ледовой поверхности. Для достижения этой цели были проведены лабораторные измерения параметров скольжения стальных полозьев по льду в контролируемых и стабильных условиях, максимально приближенных к полевым условиям. **С технической точки зрения цель проведения настоящего исследования состояла** в оптимизации размеров поперечного сечения полозьев в соответствии с характеристиками ледовой поверхности и нагрузкой.

## Материалы и методы

### Образцы

Размеры поперечного сечения определялись посредством измерения двух углов  $W_0$  и  $W_i$  и длины  $L$ , как это показано на рисунке 1. В настоящем исследовании устанавливалось два уровня данных параметров – *высокий* и *низкий*. По причине соблюдения конфиденциальности их точные показатели не указываются. В целях минимизации количества образцов применялся статистический метод Тагучи (Rou [R1]), который позволил сократить количество образцов от 8 до 4.

Геометрические измерения этих четырех образцов обобщены в таблице 1. Исследуемые образцы имели длину контакта 15 мм и были закруглены с обоих концов во избежание режущего эффекта льда. Образцы были отполированы очень тонкой наждачной бумагой для получения такой же шероховатости поверхности как у полозьев, применяемых во время соревнований.

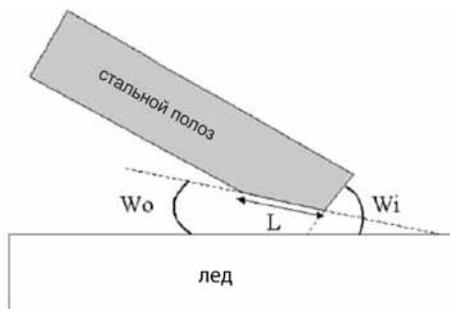


Рисунок 1. Перекрестное сечение стального полоза саней

### Измерительные приборы и методы

#### Прибор для измерения ударного трения

Прибор для измерения ударного трения позволяет определять силу трения и проникновение различных материалов вглубь поверхности льда или снега. Данный прибор состоит из силовой платформы фирмы «Kistler» и регулятора движения, к которому крепится обра-

Таблица 1. Размеры поперечных сечений образцов полозьев, применяемых в лабораторных экспериментах

Образец	Задний угол ( $W_0$ )	Длина ( $L$ )	Внутренний угол ( $W_i$ )
G1	низкий	низкая	низкий
G2	низкий	высокая	высокий
G3	высокий	низкая	высокий
G4	высокий	высокая	низкий

зец полоза (рис. 2) и который может перемещаться в горизонтальном и вертикальном направлениях.

С помощью силовой платформы осуществляется измерение нормальной силы (вертикально направленная сила), силы трения и поперечной силы во время контакта образца с ледовой поверхностью. Регулятор движения позволяет регистрировать вертикальное и горизонтальное смещение. Экспериментальные данные регистрировались при частоте дискретизации 25 кГц.

В настоящем исследовании нормальная сила устанавливалась на уровне 100 и 200 Н, что соответствует показателям сил, действующим на 0,1 м каждого полоза саней на прямых участках и виражах с высо-



Рисунок 2. Прибор для измерения ударного трения, применяемый для измерения трения и глубины проникновения полозьев саней внутрь льда

ким радиусом кривизны. Постоянная скорость скольжения составляла 1 м/с. Температуры помещения и льда были одинаковыми при проведении всех экспериментов и устанавливались на уровне  $-2^{\circ}\text{C}$  и  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Влажность воздуха колебалась от 20 до 50%. Блоки льда изготавливались из обычной водопроводной воды в алюминиевых ящиках. Поверхность блоков выравнивалась путем срезания выступов острым лезвием.

## **Анализ следов на льду**

Для точного описания параметров глубины и ширины следов, оставляемых полозьями на льду, были взяты их отпечатки. Эти отпечатки использовались также для контроля шероховатости поверхности льда и обеспечения воспроизводимости процедуры подготовки льда. Отпечатки следов получали с применением двухкомпонентной силиконовой пасты «Mikrosil». Точность нанесения пасты находилась в пределах 1 микрометра.

Анализ отпечатков выполнялся с помощью оптического прибора Micro Prof®, разработанного фирмой Fries Research & Technology GmbH.

Micro Prof® представляет собой бесконтактный прибор, предназначенный для высокоточных измерений, включая измерения контуров, шероховатости и топографии. В основе действия прибора лежит помещение исследуемого объекта под сфокусированный белый свет. Внутренняя пассивная оптика посредством хроматической аберрации расщепляет белый свет на различные цвета, соответствующие разной длине волн. Миниатюрный спектрометр выявляет цвет света, отражаемого изучаемым образцом, и определяет положение точки фокуса, затем посредством внутренней калибровочной таблицы устанавливается ее вертикальное положение на поверхности образца. Для анализа результатов измерений использовалось программное обеспечение Mark III®.

### **Измерения твердости льда**

В связи со значительной «ползучестью льда» (Bowden 1955, Barnes *et al.* 1971) его твердость должна измеряться с применением динамического теста, предусматривающего очень короткое время нагрузки, характерное для санного спуска.

Для определения твердости льда применяется измерительный прибор Equotip®, производимый компанией Proceq S.A. Этот прибор состоит из монолитного тела с твердым металлическим наконечником ( $\varnothing$  3мм), который подводится к поверхности льда с помощью пружины. При ударе наконечника об исследуемую поверхность про-

исходит ее деформация, что сопровождается потерей кинетической энергии. Потери энергии рассчитываются посредством измерений скорости. Напряжение сигнала пропорционально скорости монолитного тела, и после электронной обработки сигнала показатели твердости льда выводятся на дисплей и сохраняются в памяти компьютера.

Измеряемая твердость льда  $L$  равна скорости обратного хода пружины, деленной на скорость соударения. Для сопоставления этих результатов с показателями твердости льда, полученными при использовании других методов измерений, применяются конверсионные таблицы (Brinell, Vickers, Rockwell), обеспечивающие 3% точность.

Данный прибор может функционировать в диапазоне температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ . Средние показатели получают на основе 10-15 измерений. Погрешность измерения составляет  $\pm 3\%$ . Точность выполняемых с помощью прибора EQUOTIP измерений зависит от шероховатости поверхности, которая не должна превышать 2 мкм.

## **Результаты и обсуждение**

### **Результаты**

С помощью описанного выше прибора для измерения ударного трения было выполнено 64 измерения. Полученные коэффициенты трения колебались в пределах от 0,01 до 0,18. Глубина проникновения внутрь льда составляла от 0,005 до 0,35 мм в зависимости от температуры льда, нормальной силы (вертикально направленной силы) и исследуемого образца. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что образцы полозьев G1 и G2, имеющие низкие величины заднего угла, обеспечивали получение наименьших показателей глубины проникновения внутрь поверхности льда и коэффициентов трения для обеих исследуемых температур (рис. 3).

На рисунке 4 показано, что увеличение глубины проникновения внутрь льда сопровождается возрастанием коэффициента трения. Однако при одинаковой глубине проникновения коэффициент трения значительно выше при  $-10^{\circ}\text{C}$ , чем при  $-2^{\circ}\text{C}$ .

### Проверка достоверности результатов Точность измерений ударной силы трения

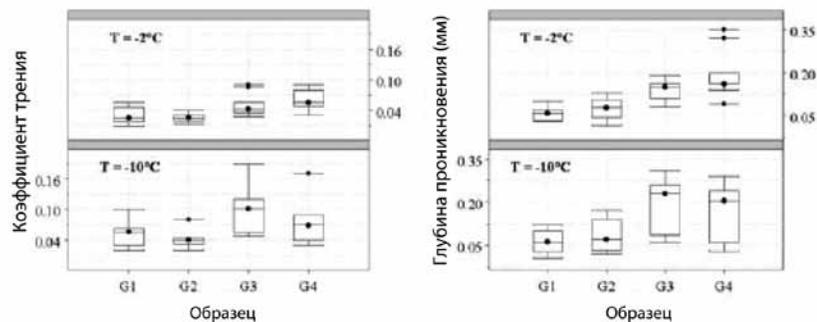


Рисунок 3. Ящичковая диаграмма коэффициента трения (слева) и глубины проникновения внутрь льда (слева) для четырех образцов полозьев, определенных с помощью прибора для измерения ударного трения

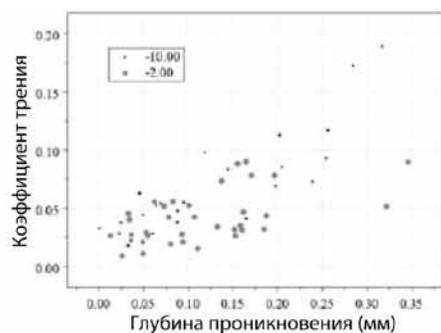


Рисунок 4. Влияние глубины проникновения внутрь льда на коэффициент трения (результаты были получены с применением прибора для измерения ударного трения)

Показатели глубины проникновения внутрь льда, зарегистрированные с применением прибора для измерения ударного трения были сопоставлены с результатами оптического анализа отпечатков следов полозьев. На рисунке 5 показан оптический анализ следов, оставленных четырьмя полозьями саней в блоке льда. Между пока-

зателями глубины проникновения, определенными при выполнении двух вышеуказанных анализов, была выявлена 95% корреляция, что указывает на высокий уровень точности измерений, выполняемых с помощью прибора для измерения ударного трения.

### Сравнение результатов лабораторных и полевых испытаний

Измерения твердости льда и отпечатков полозьев саней выполнялись на искусственной ледяной санной трассе в Оберхофе 12 января 2007 года. Температура льда была  $-2^{\circ}\text{C}$ . Следы, оставляемые лезвиями, имели глубину от 0,06 до 0,08 мм в плоских частях, что имеет хорошую корреляцию с показателями, измеряемыми в лабораторных условиях при одинаковой нагрузке.

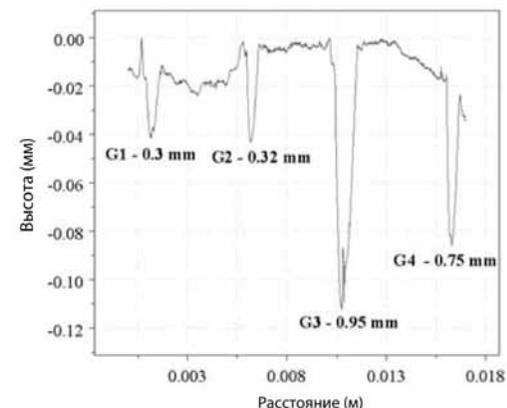


Рисунок 5. Оптический анализ отпечатков, оставленных на льду полозьями саней при испытаниях на ударную силу трения (под каждым следом указана глубина проникновения, измеренная с помощью прибора для измерения ударного трения)

Средняя твердость льда,  $L$ , составила  $130 \pm 15$ , что соответствует среднему показателю  $121 \pm 25$ , измеренному в лабораторных условиях при той же температуре. На основании данных результатов был сделан вывод, что лабораторные эксперименты позволяют воспроизводить полевые условия с достаточно высокой степенью точности.

## Заклучение и перспективы будущих исследований

Анализ влияния трех главных параметров, определяющих величину площади поперечного сечения полозьев саней, проводился в контролируемых лабораторных условиях с помощью нового прибора для измерения ударного трения.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии заднего угла полозьев саней на глубину проникновения и трение. Кроме того, было продемонстрировано, что данный прибор обеспечивает высокую точность результатов измерений и высокий уровень их соответствия результатам, полученным при выполнении измерений в полевых условиях.

На основе данных, полученных в лабораторных условиях были предложены новые параметры площади поперечного сечения полозьев, обеспечивающие низкий уровень трения и оптимальную для управления санями глубину проникновения внутрь ледовой поверхности с учетом разных типов льда и нагрузок.

Эти новые геометрические параметры были испытаны в полевых условиях. Предварительные результаты данных испытаний подтверждают выводы, сделанные при проведении настоящего исследования.

В настоящее время разрабатываются системы аналитических расчетов контактной площади и глубины проникновения для различных нагрузок, температур льда и размеров площади поперечного сечения полозьев.

*Цель данных расчетов заключается в предложении оптимальных геометрических характеристик полозьев.*

На заключительном этапе планируется проведение дополнительных измерений в лабораторных условиях для анализа влияния шероховатости поверхности, типа материала и обработки поверхности на коэффициент трения полозьев.

Выполнение данной задачи значительно облегчается благодаря отсутствию ограничений Международной федерации бобслея и тобогана в отношении вышеупомянутых свойств полозьев.

## Литература

- [AE1] Akkok M., Ettles C., Calabrese S.J., «Parameters affecting the kinetic friction of ice», Journal of Tribology, 109 552-561, 1987.
- [BT1] Barnes P., Tabor D., Walker J.C., «The friction and creep of polycrystalline ice», Proc. Roy. Soc. Lond. A., 324 127-155, 1971.
- [B1] Bowden F.P., «Friction on Snow and Ice», Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 217 (1131) 462-478, 1953.
- [CN1] Colbeck S.C., Najarian L., Smith H.B., «Sliding temperatures of ice skates», Am. J. Phys., 65 (6) 488-492, 1997.
- [E1] Ericksson R., «Friction of runners on snow and ice», Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Corps of Engineers, US Army, 1955.
- [EN1] Evans D.C.B., Nye J.F., Cheeseman K.J., «The kinetic friction of ice», Proceeding of the Royal Society of London A, 347, 493-512, 1976.
- [FT1] Forland K.A., Tatinclaux J.-C. P., «Kinetic friction coefficient of ice», CRREL Report 85-6, 1985.
- [H1] Hainzmaier C., A tribologically optimized bobsleigh runner, Zentralinstitut für Medizintechnik, Technische Universität München, 2005.
- [IH1] Itagaki K., Huber N.P., Lemieux G., «Dynamic friction of a metal runner on ice», CRREL Report 89-14, 1989.
- [OK1] Oksanen P., Keinonen J., «The mechanism of friction of ice», Wear, 78 315-324, 1982.
- [P1] Petrenko V.F., «The effect of static electric fields on ice friction», Journal of applied physics, Vol. 76 (2), 1216-1219, 1999.
- [PC1] Petrenko V.F., Colbeck S.C., «Generation of electric fields by ice and snow friction», Journal of applied physics, Vol 77(9), 4518-4521, 1995.
- [PR1] Petrenko V.F., Ryzhkin I.A., «Surface state of charge carriers and electrical properties of the surface layer of ice», Journal of physical chemistry B, Vol 101, 1997.
- [PW1] Petrenko V.F., Whitworth R.W., «Physics of ice», Oxford University Press, 1999.
- [P2] Petrovic J.J., «Review – Mechanical properties of ice and snow», Journal of Material Science, 38 1-6, 2003.
- [R1] Roy R.K., «Design of experiments using the Taguchi approach», John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [S1] Schulson E.M., «The structure and mechanical behaviour of ice», JOM, 51 (2) 21-27, 1999.
- [T1] Tusima K., «Friction of a steel ball on a single crystal of ice», Journal of Glaciology, 19 (81) 225-235, 1977.

## РАЗРАБОТКА, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ БОБСЛЕЙНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ СПОРТСМЕНОВ–ОЛИМПИЙЦЕВ

*Design, Build, and Test of a Bobsled Simulator for Olympic Athletes*  
Mark Wacker, Arthur Erdman, Troy Nickel, Marie Guion Johnson  
University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455  
(Journal of Medical Devices, – 2007, – Vol. 1, – pp 96-102)

Бобслей означает спуск по специальной трассе на двух- или четырехместных санях со скоростью 80–90 миль в час. Бобслеисты делятся на спортсменов двух типов – пилоты (рулевые) и разгоняющие (толкатели, толкачи).

*Пилот управляет санями и является лидером экипажа, в то время как главной задачей разгоняющих является обеспечение быстрого старта. Спортсмен, занимающий место в задней части саней, называется тормозящим.* Он приводит в действие тормоз (тормозной стержень, погружающийся в лед) после пересечения санями финишной черты. Разгоняющих часто отбирают из числа футболистов и легкоатлетов.

На старте спортсмены бегут по льду в специальных ботинках с 500 крошечными шипами на подошвах, которые производятся только фирмой Adidas [1].

*Экипаж четырехместного боба* состоит из пилота, тормозящего и двух толкателей. Сани имеют более 12 футов в длину, и их вес вместе с экипажем не должен превышать 1500 фунтов (630 кг).

*В состав экипажа бобслейной двойки* входят пилот и разгоняющий (тормозящий). Двухместный боб имеет длину примерно 9 футов, и его предельная масса равна 860 фунтов (390 кг). Сани оснащены полозьями, которые могут варьировать в зависимости от конфигурации трассы, ледовой поверхности и погодных условий [1-3].

Бобслейные гонки могут быть выиграны или проиграны уже на старте. *Экипажи имеют в распоряжении 50 метров для разгона саней до*

*достижения необходимой скорости, недостаток которой невозможно наверстать во время последующего спуска.* Затем члены экипажа запрыгивают на сани и начинают движение по трассе.

На всех олимпиадах применялись разные трассы. **Но существуют некоторые стандартные правила:** трасса должна быть протяженностью минимум 1300 м, иметь минимум 15 поворотов и виражей и надлежащий перепад высот, поскольку движущей силой бобслейного спуска служит естественная гравитация.

При преодолении некоторых виражей бобслеисты могут испытывать на себе силу тяжести, в пять раз превышающую ее нормальный уровень.

Окончательный победитель объявляется после четырех заездов в соревнованиях среди мужчин и двух заездов среди женщин. Зачастую победу решает всего одна тысячная доля секунды.

Для повышения результативности в бобслее спортсмены должны иметь возможность для постоянных систематических тренировок в течение всего года. Однако в мире существует только 16 бобслейных трасс олимпийского уровня, главным образом на территории Европы [1]. Стоимость бобслейных саней составляет десятки тысяч долларов, при этом большинство команд обычно могут выполнять только шесть тренировочных спусков в день [2]. Это означает, что они имеют сравнительно мало тренировочного времени для совершенствования своего спортивного мастерства.

В отличие от других видов спорта у них нет возможности постоянного многократного повторения тех или иных действий, для того чтобы найти лучшие и наиболее рациональные комбинации их выполнения, так как количество тренировочного времени жестко лимитировано.

**Цель данного исследования** состояла в оптимизации параметров старта вне пределов санно-бобслейной трассы с помощью использования разрабатываемого в процессе эксперимента специального тренажера имитирующего старт в бобслее.

Начало данному исследованию было положено после того, как во время Национальных испытаний в Парк Сити 2001 г. к коллективу Университета штата Миннесота обратилась двукратная чемпионка олимпийских игр по тобогану и надежда американского бобслея с просьбой о создании биомеханического устройства, позволяющего имитировать старт бобслейного заезда.

При этом она указала на *двойную цель* применения подобного стартового тренажера – *во-первых*, определение и научное обоснование оптимальной высоты рукоятки для толкания и, *во-вторых*, сокращение времени старта как минимум на 0,1 сек.

Впервые женский бобслей был включен в список олимпийских дисциплин во время олимпиады 2002 года. *При этом женские экипажи использовали сани такой же конструкции, как и в мужском бобслее.*

Это указывает на отсутствие попыток внести необходимые изменения в конструкцию саней, в частности, изменить высоту рукояток для толкания, с учетом особенностей женского организма (телосложения).

Концепция, лежащая в основе создания данного бобслейного тренажера, заключалась в том, чтобы спортсмен оставался в основном в неподвижном состоянии при движении высокомогущной беговой дорожки под его ногами.

Это представляет собой контраст движению атлета и саней вдоль трассы. В результате была создана высокотехнологичная беговая дорожка с компьютеризированным контролем скоростей, с рукояткой, соединенной с динамометрическим датчиком с 6 степенями свободы, и регулируемым крепежным механизмом, связывающим динамометрический датчик и рукоятку боба с беговой дорожкой.

На рисунке 1 изображена окончательная система, которая была продемонстрирована на Ярмарке штата Миннесота.



Рисунок 1. Исследователи, демонстрирующие систему во время Ярмарки штата Миннесота 2001 г.

## Конструкция

В данном разделе приводится описание окончательной конструкции бобслейного тренажера. Здесь также содержится информация о двигателе и блоках управления беговой дорожкой.

На рисунке 2 показано схематическое изображение основной системы. В состав системы входит рукоятка для толкания боба, подсоединенная к динамометрическому датчику с 6 степенями свободы для измерения действующей силы. Выходные напряжения всех шести каналов динамометрического датчика считываются формирователем сигналов и передаются на аналого-цифровую панель компьютера, где они подвергаются дискретизации с максимальной частотой 1000 образцов/с.

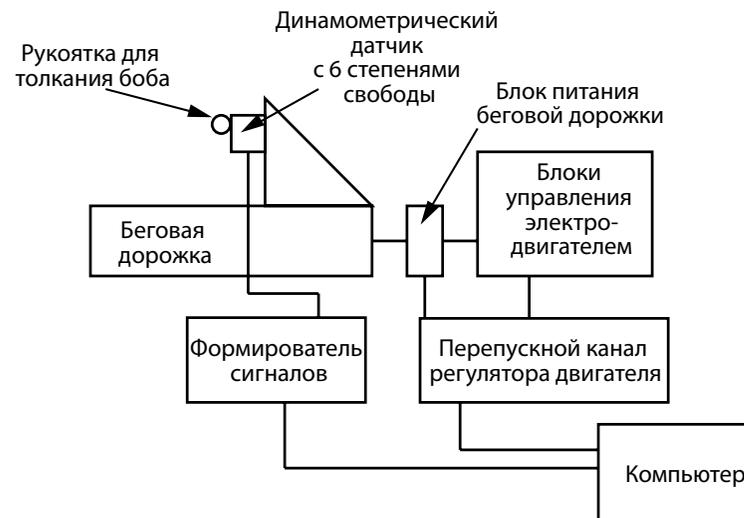


Рисунок 2. Схематическое изображение системы

В целях осуществления контроля скорости беговой дорожки с компьютера, блоки управления электродвигателем посылают четыре сигнала ввода/вывода и 1 аналоговый сигнал напряжения на блок питания беговой дорожки, позволяющие регулировать ее основные функции. Перепускной канал (байпас) регулятора двигателя контро-

лируется компьютером и имитирует эти пять входных сигналов, поступающих на блок питания беговой дорожки.

В данной системе применяется восьмиканальный формирователь сигналов для измерения напряжения динамометрического датчика и четыре твердотельных реле с одним цифро-аналоговым выходом для управления двигателем.

Перепускной канал регулятора двигателя и формирователь сигналов были разработаны и изготовлены компанией Enduratec Systems Inc., которая также служила поставщиком аналого-цифровых, цифро-аналоговых, осуществляющих прямой ввод-вывод компьютерных панелей и их программного обеспечения WINTEST©.

Рукоятка для толкания боба подсоединяется напрямую к динамометрическому датчику с помощью регулируемого крепежного механизма, разработанного Aspen Research Corporation (рис. 3).

Беговая дорожка имеет максимальную скорость 28 миль/час, и ее наклон может регулироваться в диапазоне от +40° до -10°.

При отсутствии управляемого с компьютера перепускного канала регулятора двигателя скорость беговой дорожки контролируется вручную с помощью аналогового регулятора напряжения и переключателей, а наклон беговой дорожки регулируется с помощью специальных кнопок наклона вверх/вниз, на которые нужно нажать и удерживать их до достижения желаемого градуса наклона.



Рисунок 3. Динамометрический датчик и рукоятка толкания боба

Перепускной канал регулятора двигателя предусматривает использование четырех твердотельных реле для имитации существующих кнопок, и аналогового выхода, имитирующего регулятор напряжения, как показано на рисунке 4.

Средства управления беговой дорожкой

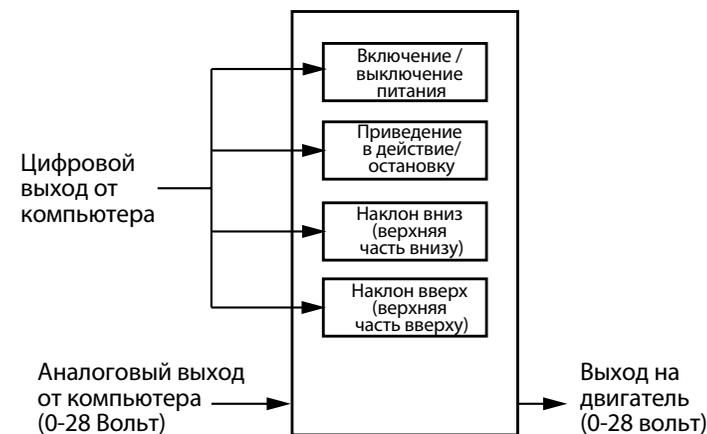


Рисунок 4. Диаграмма регулятора

Таким образом, беговая дорожка управляется путем переключения питания и приведения реле включения / выключения в положение «on,» что приводит к подаче напряжения на беговую дорожку. Наклон беговой дорожки вверх или вниз не имеет решающего значения для данной системы стартового бобслейного тренажера. В связи с необходимостью в экономии времени программные средства для наклона не были полностью разработаны.

В будущем, возможно, потребуется добавить данную степень свободы в связи с присутствием изменения наклона в верхней части въезда на старт санно-бобслейной трассы. Поскольку выходным сигналом для беговой дорожки служит напряжение от 0 до 28 вольт, его соотношение к скорости составляет один к одному, то есть 1 вольт соответствует 1 миле в час, как это предусмотрено градуированием данной конструкции производителем.

Исходя из полномасштабной выходной мощности, были созданы профили скоростей, соответствующих скоростям, показываемым на старте бобслейного заезда. В их основу были положены данные, зарегистрированные ранее для бобслейной четверки из США (рис.5), которые были предоставлены нам Сарой Смит. Обычно продолжительность стартовых профилей составляет 8 секунд, при этом беговая дорожка устанавливается на 70–100% от зарегистрированных показателей скорости. На рисунке 6 показано построение кривой графика, показывающего соотношение между средними показателями расстояния и времени для мужской четверки, а на рисунке 7 представлены фактические профили скорости на старте. Поскольку производная данного подбора кривых дает ненулевую скорость на старте, второй член аннулируется, и только характеристика разгона (преобразованная в мили в час) применяется для создания профилей, применяемых в данном тренажере с беговой дорожкой.

Эти профили сохраняются в текстовых файлах, которые загружаются программой WINTEST компании Endurates, и выводятся на беговую дорожку при проведении испытаний.



Рисунок 5. Стартовые данные бобслейной мужской четверки из США

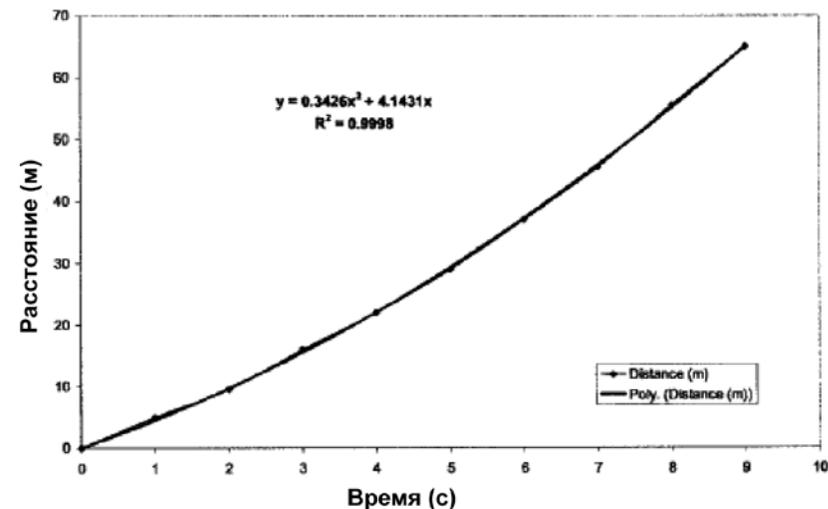


Рисунок 6. Построение кривой для стартовых данных бобслейной мужской четверки из США



Рисунок 7. Нормированные профили скорости

## Сбор данных

В этом разделе описывается система сбора данных, применяемая с использованием данного тренажера, включая выходные данные динамометрических датчиков и анализ данных. В тренажере применяется динамометрический датчик AMTI MC3A с 6 степенями свободы и максимальной нагрузкой 1000 фунтов. Он позволяет осуществлять измерения до 1000 фунтов сжимающей нагрузки и до 500 фунтов нагрузки в горизонтальном и вертикальном направлениях. Он также может применяться для измерения вращающего момента до 500 фунт-дюймов и моментов до 1000 фунт-дюймов в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Динамометрический датчик выводит на отдельные каналы аналоговые сигналы напряжением  $6 \pm 10$  вольт. Затем программа WINTEST регистрирует данные в текстовом файле с разделителями.

После регистрации данных программа визуализации открывает файл данных и выдает отчет в формате Excel. На рисунке 8 показан пользовательский интерфейс для данной программы, который отображает данные по фактической и средней силам, действующим в течение каждой секунды.

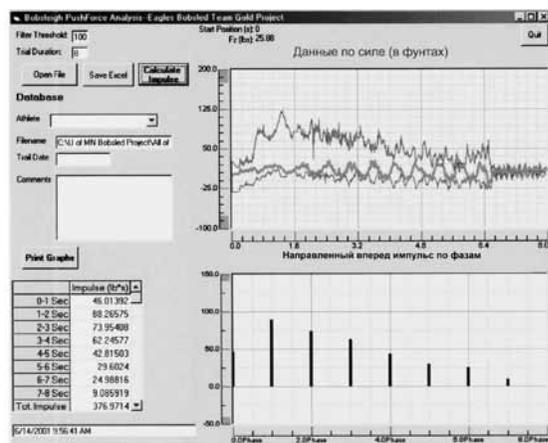


Рисунок 8. Программа анализа исходных данных: три графика показывают горизонтальную (верхний график), боковую и вертикальную (нижний график) силы

На рисунках 9 и 10 показаны выходные данные в формате Excel.

На рисунке 10 представлен график, где синяя линия изображает направленную вперед силу (усилие от себя), которая вызывает ускорение движения боба и которую спортсмены стремятся увеличить до максимального предела. На этом графике также показаны силы, направленные вниз и слева направо. При этом особую важность имеет направленная вниз сила, потому что она направлена на регулирование рукоятки до оптимальной для каждого спортсмена высоты и тем самым служит для оптимизации направленной на разгон боба передней силы. Ее величина может также указывать на то, что спортсмены используют неправильную высоту рукоятки и направляют свое усилие вниз вместо того, чтобы сконцентрировать его направление строго вперед, чтобы придать ускорение бобу.

На рисунке 9 показана средняя сила, действующая в течение каждой секунды, на протяжении первых 8 секунд разгона, и общий импульс, равный сумме сил за все 8 секунд. Этот график применялся для суммирования результатов каждого толкания боба. Он позволил спортсмену получить общее представление об общих затратах сил,

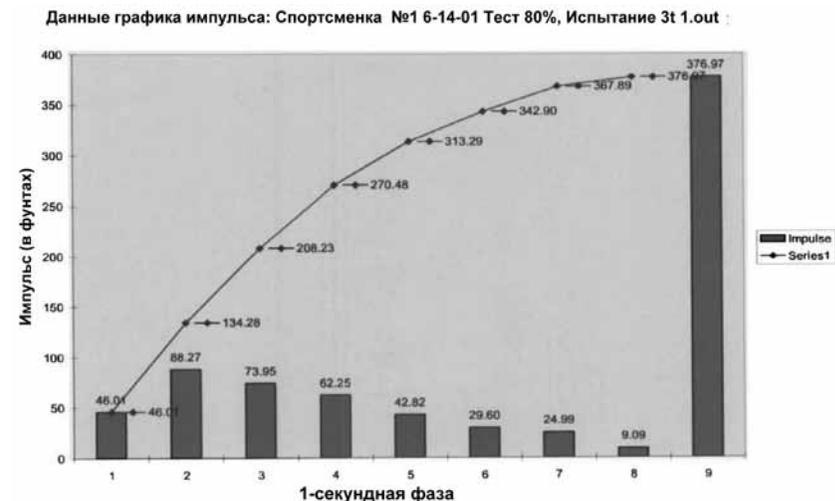


Рисунок 9. Образец выходных данных по импульсу, включая импульс за каждую секунду, общий импульс за каждую секунду и суммарный импульс

прилагаемых к бобслейным саням. При этом были выявлены спортсмены, которые могли затрачивать большое количество энергии на толкание саней при медленных скоростях, но были недостаточно чтобы затрачивать достаточное количество энергии при более высоких скоростях. Наиболее эффективно действующими спортсменами считаются те, которые прилагают к саням наиболее высокую суммарную силу.

Конечная программа, разработанная в ходе настоящего исследования, объединяет обе указанные выше компьютерные программы. Она позволяет управлять беговой дорожкой, осуществлять сбор данных и выводить на дисплей показатели силы в реальном масштабе времени. Она также может выполнять множество новых функций, например, открывать данные сразу нескольких испытаний для сравнения результатов.

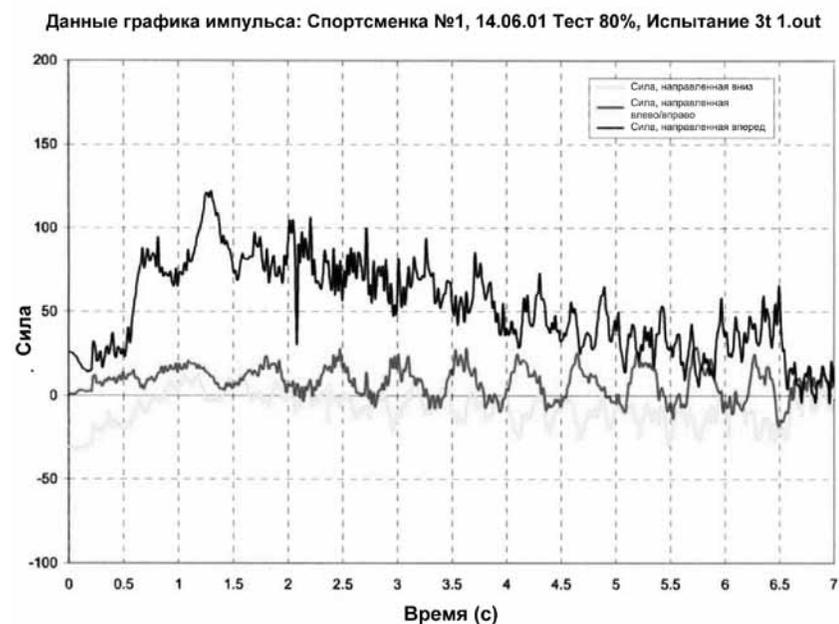


Рисунок 10. Образец выходного импульса

Пользовательский интерфейс данной программы показан на рисунке 11.

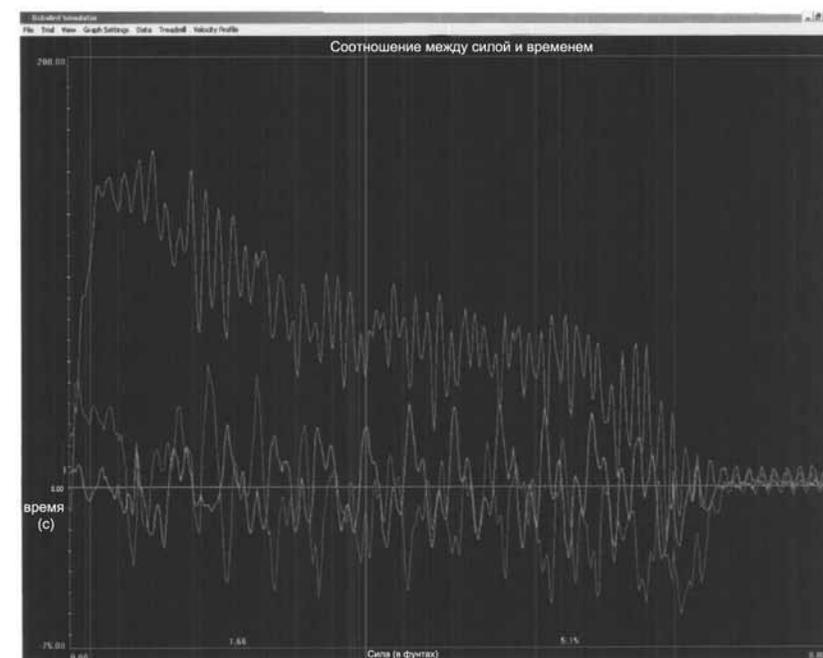


Рисунок 11. Вывод данных на дисплей с применением конечной программы

## Результаты

Бобслейный тренажер сразу же продемонстрировал эффективность своего применения. Так, у спортсменки №1 было зарегистрировано изменение стиля бега уже после самого первого эксперимента с применением исходного деревянного опытного образца.

При этом она немедленно осознала, что при ее обычном стиле бега ей не удастся достичь максимальной горизонтальной силы. С тех пор было разработано много новых тренировочных упражнений и тестов. Один из тестов состоял в том, чтобы установить беговую дорожку на постоянную скорость и измерять импульс спортсмена каждую секунду.

На рисунке 12 можно видеть резкое увеличение толкающего усилия спортсменки №1 при постоянной скорости, достигнутое ею в течение 5-месячного периода времени. На графике показан импульс направленной вперед силы при проведении испытаний при постоянной скорости 3, 5 и 9 миль/ч при сопоставлении результатов, измеренных 25.05.02 и 02.10.01. Данной спортсменке удалось улучшить выходные данные для каждой скорости.

Бобслейный тренажер применялся также для оптимизации высоты рукоятки для толкания боба. На основе тестов, выполненных на данном бобслейном тренажере, оптимальная высота толкания для спортсменки №1 отличалась на 1,75 дюйма от номинальной высоты, указанной членами экипажа (значимое изменение).

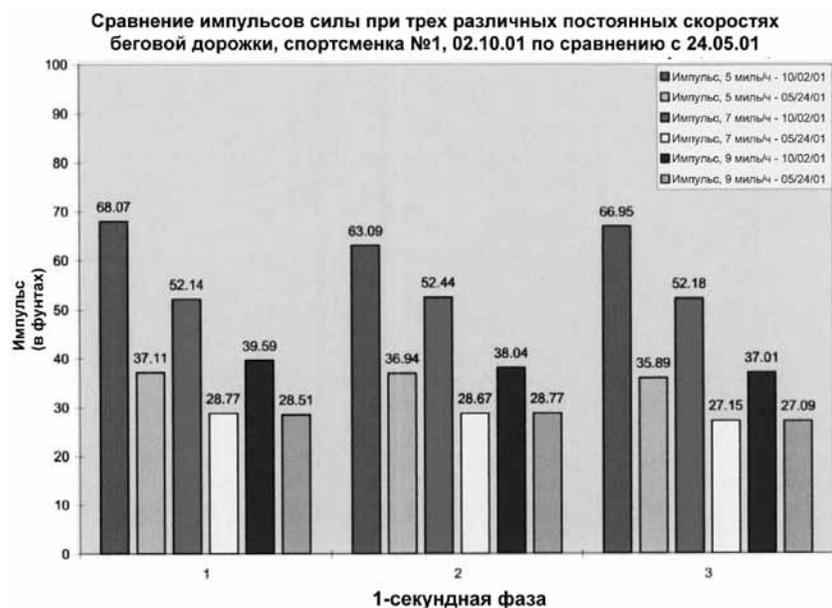


Рисунок 12. Сравнение импульсов силы спортсменки №1

Данная система также продемонстрировала возможность ее успешного применения для определения времени посадки бобслеиста в сани.

На рисунке 13 изображен график выходных данных спортсменки №2, являющейся членом команды США по бобслею и обладательницей золотой медали. Через 5,5 секунд сани начинают двигаться со скоростью 14 миль/ч, и направленная вперед сила спортсменки опускается ниже нулевой отметки. После этого дальнейшее толкание боба будет вызывать замедление его движения, поэтому именно в данный момент времени спортсменка должна прыгнуть в сани.

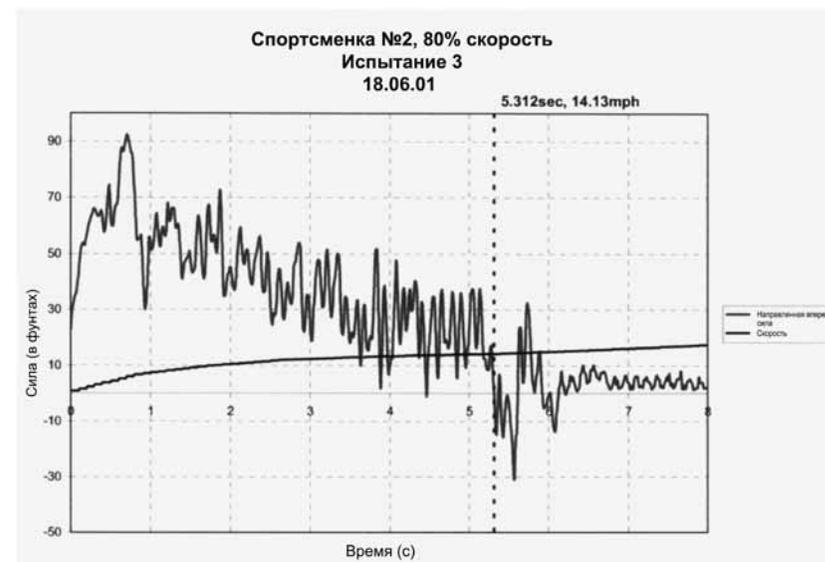


Рисунок 13. Данные испытаний спортсменки №2

Данная система также доказала свою эффективность при отборе в национальную команду США по бобслею. Она позволила тренерам сравнить численные показатели спортсменов.

При сопоставлении конечных результатов можно определить, какие спортсмены сообщают бобу более высокую скорость (рис. 14).

В ходе проводимого нами экспериментов обследуемые спортсменки 3 и 4 сообщали саням наибольшее количество энергии по сравнению с другими участниками. И, что особенно важно, при повышенных скоростях лучшие разгоняющие все еще были способны вызывать ускорение саней [4,5].

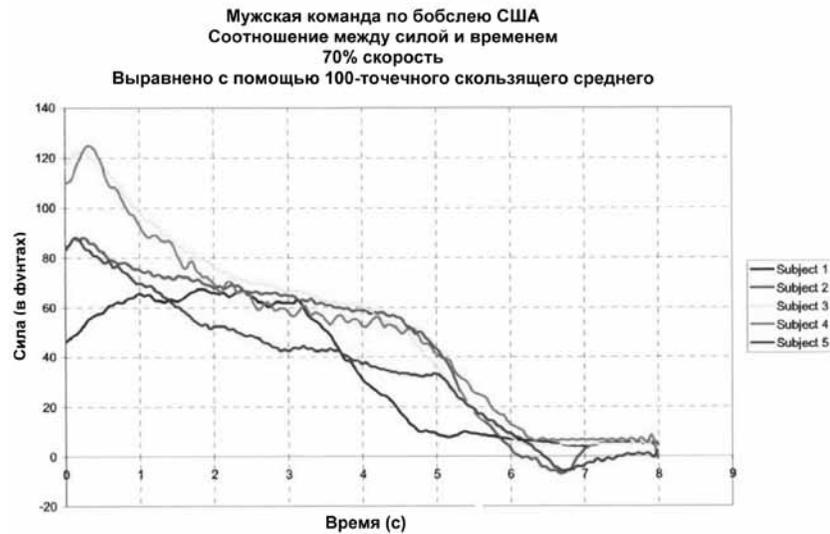


Рисунок 14. Сравнение результатов спортсменов из мужской команды США по бобслею

## Выводы

В результате проведенных исследований была создана система, состоящая из высокотехнологичной беговой дорожки с компьютеризованным контролем скорости, рукоятки для толкания боба, соединенной с динамометрическим датчиком с 6 степенями свободы, и регулируемого крепежного механизма, связывающего динамометрический датчик и рукоятку для толкания боба с беговой дорожкой.

Данный тренажерный комплекс прошел контрольные испытания, которые обнаружили эффективность его применения не только для оптимизации толкающего усилия, но и временных характеристик разбега шести спортсменов — членов олимпийской команды США.

1. U.S. Bobsled and Skeleton Federation (USBSF), 2006, «History of the Bobsled», from <http://www.usbsf.com/bobhistory.htm>
2. Kelly, A., and Hubbard, M., 2000, «Design and Construction of a Bobsled Driver Training Simulator», *Sports Eng.*, 3(1), pp. 13–24.
3. Ulman, D. G., and Cross, C., 1979, Engineering a New-Generation Bobsled, ASME Paper No. 79-DE-E-5.
4. Baumann, W., 1973, «The Influence of Mechanical Factors on Speed in Tobogganing», *Biomechanics III*, 8, pp. 453–459.
5. Hubbard, M., Kallay, M., and Rowhani, P., 1989, «Three-Dimensional Bobsled Turning Dynamics», *International Journal of Sport Biomechanics*, 5, pp. 222–237.

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ, СТРУКТУРЫ И ГИДРОФОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ТРЕНИЕ ЛЬДА

---

*Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity*  
Kietzig, Anne-Marie; Hatzikiriakos, Savvas G.; Englezos, Peter;  
Department of Chemical and Biological Engineering, The University of British  
Columbia, Vancouver, British Columbia V6T 1Z3, Canada  
(*Journal of Applied Physics*, – 2009, – Volume: №106, – Issue:2, – pp. 024303 – 024303-7)

Влияние шероховатости, структуры и гидрофобности поверхности на трение льда было подвергнуто систематическому исследованию при применении широкого диапазона температур и скоростей скольжения и нескольких типов контактирующих со льдом металлических поверхностей.

Гидрофобность в сочетании с контролируемой шероховатостью, измеряемой в нанометрах, имитировалась с помощью действующего в течение фемтосекунд лазерного облучения, позволяющего воспроизвести «*эффект лотоса*» (крайне низкой смачиваемости поверхности).

Контролируемая шероховатость значительно повышает коэффициент трения при низких скоростях скольжения и температурах ниже точки плавления льда. Однако при температурах, близких к точке плавления, и относительно высоких скоростях шероховатость и гидрофобность значительно уменьшают трение льда. Это снижение трения происходит главным образом за счет разрушения капиллярных мостиков, несмотря на присутствие неровностей поверхности, способствующих их образованию.

Наконец, желобки (канавки), ориентированные в направлении скольжения, также способствуют значительному сокращению трения в диапазоне низких скоростей в отличие от царапин и желобков, произвольно распределенных по поверхности.

## ТРЕНИЕ ЛЬДА: ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

---

*Ice friction: the effect of thermal conductivity*  
Kietzig, Anne-Marie; Hatzikiriakos, Savvas G.; Englezos, Peter  
(*Journal of Glaciology*, – 2010, – Volume 56, – № 197, – pp. 473-479)

Влияние теплопроводности на трение льда подвергалось систематическим исследованиям по отношению к различным металлическим контактными поверхностям при широком диапазоне температур и скоростей скольжения.

Влияние теплопроводности изолирующего материала на трение льда исследовалось посредством теплоизоляции контактной поверхности стекловолокном.

*Было выявлено снижение коэффициента трения в режиме граничного трения и более раннее наступление режима смешанного (полужидкостного) трения в зависимости от скорости скольжения.*

Кроме того, зависимость коэффициента трения льда от скорости скольжения сравнивалась для различных материалов контактирующих со льдом поверхностей. Было также обнаружено, что влияние и значение теплопроводности уменьшается при увеличении скорости скольжения.

## ПОВРЕЖДЕНИЕ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ НА СТАРТЕ САННО-БОБСЛЕЙНОЙ ТРАССЫ

*Damage in a bobsleigh start track braking system*

*Jeffrey Vogwella, José María Minguetz*

*a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Design, University of Bath, Claverton Down, Bath, Somerset BA27AY, United Kingdom*

*b Dpto. de Física Aplicada II, Facultad de Ciencia y Tecnología Universidad del País Vasco, Aptdo. 644 48080 Bilbao, Spain*

*(Engineering Failure Analysis, – 2009, – Volume 16, – Issue 4, – pp 1109-1117)*

Для проведения тренировок своих высококвалифицированных спортсменов в Университете г. Бата была построена стартовая система для санно-бобслейной трассы. Она используется членами бобслейных экипажей Великобритании (одиночка, мужские двойка и четверка) для отработки маневров разгона саней и посадки на старте, которые являются важнейшим компонентом бобслейного спуска [2,3].

Угол наклона стартового участка трассы имитирует первые 80 м санной бобслейной трассы в Солт-Лейк-Сити, США, со средним уклоном 7,8%. Однако данная стартовая трасса отличается от традиционной тем, что, в то время как стандартные бобы имеют полозья и движутся по ледяной поверхности, бобы применяемые для тренировок с использованием вышеуказанной стартовой системы Team Bath были модифицированы для движения на стальных колесах по узкоколейному рейсовому пути в связи с необходимостью проведения круглогодичных тренировок в условиях умеренного климата Великобритании.

Поскольку область старта является только частью всей трассы, вскоре после того как боб вместе с экипажем начинает спуск на скорости, должна быть приведена в действие тормозная система, обеспечивающая его безопасную остановку. Это является насущным требованием, поскольку полная масса боба и его экипажа может

составлять до 700 кг и он может разогнаться до скорости 30 м/ч, но в связи с пространственными ограничениями на университетской трассе в Бате, он должен быть остановлен в пределах тормозного участка длиной 10 м.

В связи со строгими требованиями, предъявляемыми к данной уникальной в своем роде тормозной системе, основанной на применении эластичных амортизирующих тросов, она была с самого начала ее сооружения главным источником проблем, связанных с ее техническим обслуживанием и устранением повреждений.

**Настоящее исследование посвящено** анализу основных этапов процесса торможения, в целях выявления, требующих исправления недостатков конструкции тормозной системы.

### Система обозначений:

- $a$  - ускорение (м/с<sup>2</sup>);
- $g$  - гравитационное ускорение (м/с<sup>2</sup>);
- $l$  - длина улавливающей трубы (м);
- $m$  - масса улавливающей трубы (кг);
- $u$  - энергия деформации (кДж);
- $w$  - распределённая нагрузка (Н/м);
- $\mu$  - коэффициент трения;
- $E$  - модуль упругости (ГН/м<sup>2</sup>);
- $l$  - пройденное расстояние (м);
- $I$  - осевой момент инерции сечения (м<sup>4</sup>);
- $M$  - масса боба и экипажа (кг);
- $V$  - скорость боба (м/с);
- $W$  - полная масса улавливающей трубы (Н);
- $\rho$  - плотность материала (кг/м<sup>3</sup>).

### Область старта и тормозная система

На рисунке 1 показана вертикальная боковая проекция области старта бобслейной трассы университета г. Бата. За участками разгона и посадки следует 50-метровый спуск, как показано на рисунке 2, на протяжении которого происходит наращивание скорости боба. Вслед за этими экспериментальными участками наблюдается выравнивание дистанции, после чего наклонная плоскость повышается в

месте нахождения тормозной системы. Данная система используется для того, чтобы вызвать остановку боба, перед тем как изменить направление его движения, тем самым, способствуя возвращению боба на исходную позицию.

Тормозная система состоит из шести высокопрочных эластичных тросов диаметром 19 мм и длиной 7 м, которые располагаются параллельно друг другу в неглубоком канале, проходящем между рельсами, как показано на рисунке 3.

С одного конца это множество тросов крепится к анкерной плите, с другого конца они надежно зафиксированы на круглом стальном стержне, получившем название улавливающей трубы, которая удерживается двумя опорными блоками, установленными в грунте по обе стороны от рейсового пути, как можно видеть на рисунке 3.

В передней части боба жестко закреплены два стержня с анкерными крючьями, которые захватываются улавливающей трубой при прохождении через нее. Затем эластичные тросы начинают растягиваться по мере замедления движения боба, и их растяжение на полную длину приводит к остановке боба.

При возвращении эластичных тросов в свое исходное состояние происходит изменение направления движения боба, что затем помогает вернуть его к месту старта. Когда боб опять проходит над опорными блоками, улавливающая труба возвращается в свое первоначальное положение, и вскоре после этого происходит полная остановка боба.



Рисунок 1. Бобслейная трасса университета г. Бата



Рисунок 2. Наклон бобслейной трассы

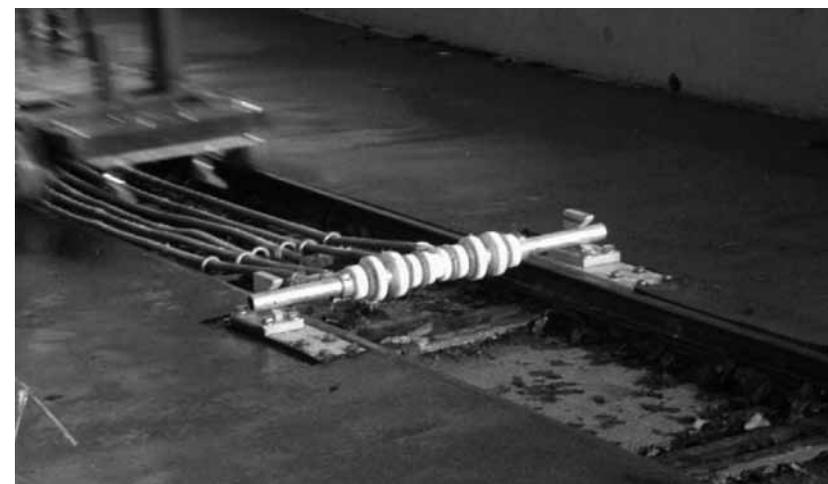


Рисунок 3. Улавливающая труба перед захватом стержней с анкерными крючками боба

## Анализ основных этапов

*Область толкания (разгона) боба и запрыгивания на борт (участки P1 до P2 на рис. 1)*

На этом участке трассы экипаж отрабатывает стартовые маневры по толканию боба и синхронизированной посадке на борт.

Этот этап важен в отношении требований, предъявляемых к тормозной системе, так как важно знать, какое количество энергии производится на данном этапе, поскольку от него зависит общее количество энергии, которое должно быть нейтрализовано в процессе торможения.

С момента старта, выполняемого из неподвижного положения, высококвалифицированные бобслеисты обычно затрачивают около 6 секунд для достижения максимальной скорости до того, как будет произведена посадка всех членов экипажа.

Для достижения цели настоящего исследования важно основывать результаты на достоверных количественных показателях, поэтому следует предположить, что скорость возрастает при равномерном ускорении, начиная от исходного состояния покоя.

При этом по окончании посадки достигается скорость ( $V_1$ ) примерно 10 м/с (так как согласно анализу простого движения  $V = 2x/t$ ). Для сравнения отметим, что эта скорость, хотя и рассчитанная для более короткой дистанции, сопоставима со средней скоростью бегуна в спринте на 100 м (беря за основу 10 секунд), и потому, если бобслеист замедлит свою скорость при посадке, он легко может остаться за бортом.

Данный участок трассы, поскольку он является горизонтальным, использовался для определения эффективного коэффициента трения между бобом (со стальными колесами) и трассой.

Это позволило с определенной степенью достоверности рассчитать величину потерь энергии на сопротивление «качению». Испытания продемонстрировали, что для разгона саней без экипажа весом 280 кг при постоянной скорости требовалась средняя сила, равная 16,4 Н. Это соответствует эффективному коэффициенту трения  $\mu$ , равному 0,006. Это значительно ниже, чем следует ожидать при движении боба на полозьях по снегу или льду. Применяя данный ко-

эффициент, а также величины полной массы саней и пройденного расстояния, была рассчитана потеря энергии, затраченная на сопротивление «качению» с помощью уравнения (1):

$$U_{RR} - \mu Mgl \quad (1)$$

где  $l$  – пройденное расстояние.

*Спуск вниз по склону (участки от P2 до P3 на рис. 1)*

На данном этапе спортсмены находятся на борту боба, который набирает скорость по мере спуска вниз по склону. Это также является важным фактором с точки зрения функционирования тормозной системы, поскольку увеличение скорости означает накопление большего количества энергии, которое должно быть уменьшено при торможении.

Для расчёта конечной скорости  $V_3$ , достигаемой перед торможением, применяется метод, основанный на определении энергетического баланса, когда кинетическая энергия на 3 этапе – кинетическая энергия на 2 этапе + потеря потенциальной энергии потери энергии на «качение»:

$$\frac{1}{2}MV_3^2 - \frac{1}{2}MV_2^2 + Mgl \tan(7.8^\circ) - \mu Mgl \sec(7.8^\circ) \quad (2)$$

где  $M$  – масса боба и экипажа

При наиболее неблагоприятной ситуации для системы торможения бобслейной четверки (боб весом 280 кг плюс экипаж с общим весом 4 x 100 кг) применяют следующие показатели:

$$\begin{aligned} \frac{680}{2}V_3^2 - \frac{680}{2}10^2 + 680 \times g \times 60 \tan(7.8^\circ) - 0.006 \times 680 \times g \times 60 \sec(7.8^\circ) \\ - 34000 + 54800 - 2400 \text{ Nm (or J)} \\ - 86.4 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Анализ количества энергии, производимой на отдельных этапах, и ее вклада в увеличение скорости движения боба перед торможением показывает, что сопротивление «качения» не оказывает значительного влияния на уменьшение энергии в процессе торможения.

На основе вышеуказанных расчетов может быть определена конечная скорость, которая равна  $V_3 = 15,9$  м/с (33 м/ч).

*Начало торможения (положение Р3 на рис. 1)*

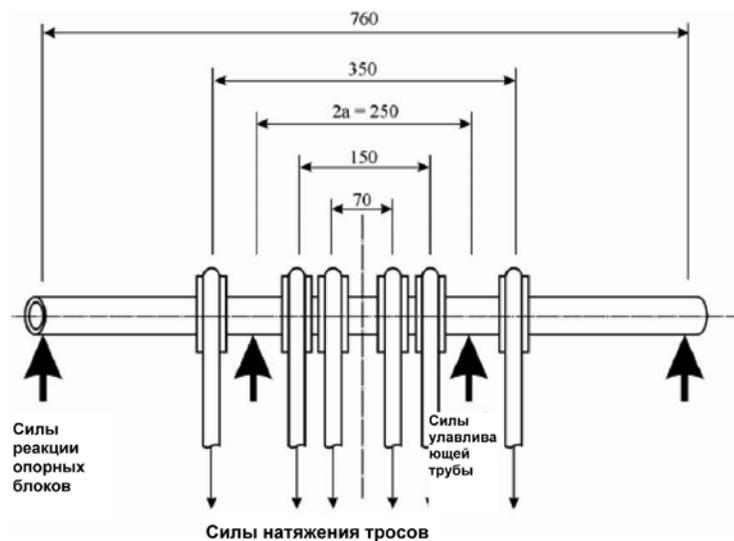


Рисунок 4. Улавливающая труба и положение опорных блоков и анкерных крючьев

Боб, достигнув максимальной скорости в точке максимальной длины спуска, начинает затем выравниваться и в положении Р3 (рис. 1) стержни с анкерными крючьями сцепляются с находящейся в неподвижном состоянии улавливающей трубой, выдвигая ее из опорных блоков, как показано на рисунках 5 и 6.

Этот этап является наиболее неприятным для находящихся в санях спортсменов из-за ударной нагрузки при сцеплении, и спортсмены считают, что это происходит в момент приложения наибольшей силы к улавливающей трубе.

При проведении анализа данной ситуации она может рассматриваться как с точки зрения сохранения импульса, так и передачи энергии, поскольку влияние предшествующей нагрузки на тросы можно не принимать в расчет при незначительном движении.



Рисунок 5. Боб-двойка до захвата улавливающей трубы

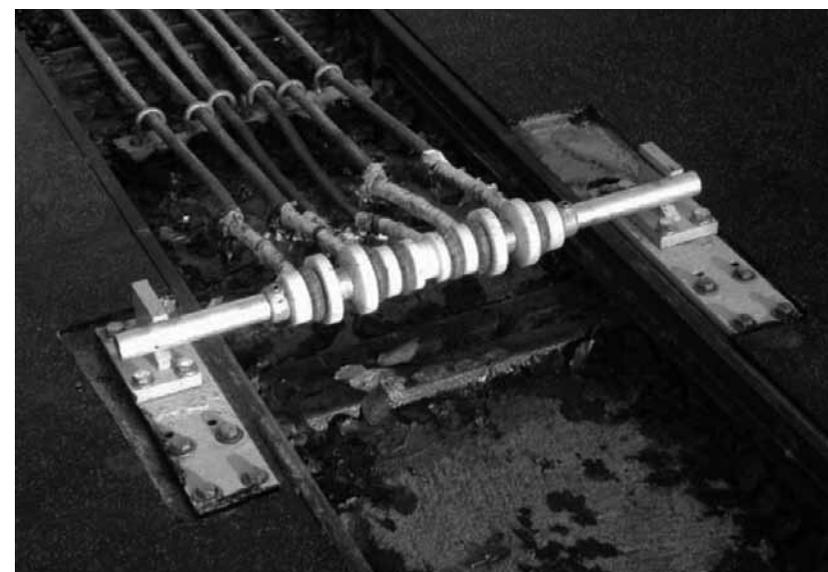


Рисунок 6. Улавливающая труба, зафиксированная в опорных блоках

Предположим, что сохранение импульса происходит в течение очень короткого промежутка времени между моментами до и после соударения, когда улавливающая труба захватывается анкерными крючьями, и обозначим массу улавливающей трубы буквой  $m$ , массу боба (вместе с экипажем) буквой  $M$  и скорость до столкновения буквой  $V$ .

Тогда сохранение импульса будет  $MV + mv = (M + m)v'$ , (3) где  $v$  – совместная скорость боба и улавливающей трубы после соударения.

Поскольку улавливающая труба первоначально находится в стационарном положении (т.е.  $v = 0$ ), то исходная скорость после столкновения равна

$$v' = \frac{M}{(M + m)}V \quad (4)$$

Равным образом, предположив, что энергия сохраняется в момент соударения, можно сделать вывод, что энергия, получаемая улавливающей трубой, представляет собой разницу между величинами кинетической энергии до и после удара. То есть:

$$U_{ст} = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}(M + m)v'^2$$

При подстановке в уравнение (2) получится:

$$U_{ст} = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}(M + m)v'^2,$$

что в упрощенной форме может быть записано как:

$$U_{ст} = \frac{1}{2} \frac{mM}{M + m} V^2 \left[ -\frac{1}{2}mv'^2 \right] \quad (5)$$

Теперь, поскольку  $M$  намного больше, чем  $m$  (обычно  $M = 680$  кг,  $m = 2,3$  кг), из уравнения (2) можно видеть, что . Следовательно, увеличение энергии деформации улавливающей трубы будет:

$$U_{ст} \approx \frac{1}{2}mV^2 \quad (6)$$

Это означает, что энергия деформации, полученная улавливающей трубой (выведенной из состояния покоя), равна количеству внезапно приобретенной ею кинетической энергии.

Данный результат очень важен и сопоставим с количеством энергии, переносимой при возврате улавливающей трубы на опорные блоки. При этом, принимая во внимание жесткую фиксацию опорных блоков, кинетическая энергия улавливающей трубы при ее резкой остановке полностью преобразуется в энергию деформации.

Этот вопрос будет обсуждаться более подробно позднее, поскольку, хотя в данный процесс вовлечены одинаковые величины передачи энергии, несущая способность балки менее адекватна на стадии возврата, что может определять ее решающую роль в повреждении тормозной системы, как можно видеть на рисунках 4, 7а и 7с.

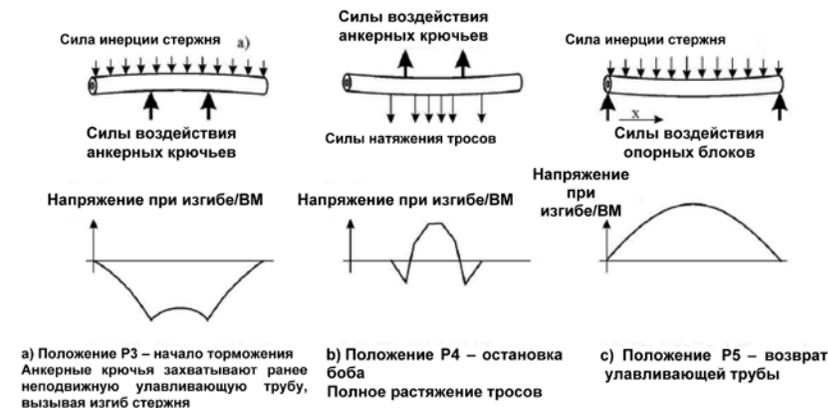


Рисунок 7. Изгибающие нагрузки и напряжения при изгибе на главных этапах торможения

### Остановка боба с тросами в состоянии максимального растяжения (положение P4 на рис. 1)

Как уже упоминалось ранее, для торможения применялись шесть параллельно установленных тросов диаметром 19 мм и с исходной длиной 7 м.

Согласно рекомендациям производителя, а также соответствующему Британскому стандарту [4] для качественного функциониро-

вания тросов допускается их максимальное растяжение на 110% от исходной длины.

Технические данные по нагрузке и растяжению, представленные производителем [5], были переведены в графическую форму, как показано на рисунке 8.

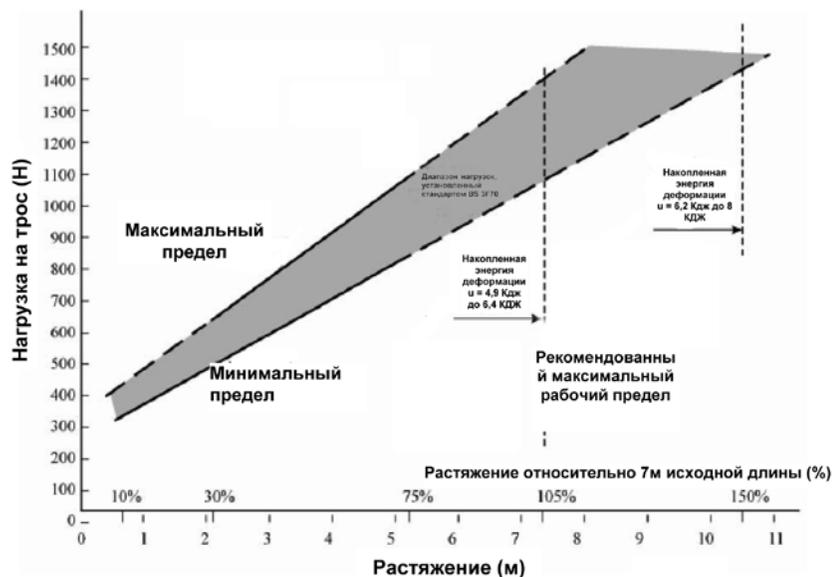


Рисунок 8. Характеристики нагрузки — растяжения для одного эластичного троса диаметром 19 мм

При этом соответствующие техническим требованиям максимальные и минимальные пределы нагрузки показаны на графике сплошными линиями, в то время как эти же характеристики, экстраполированные в соответствии с их фактическим рабочим диапазоном, изображены пунктирными линиями.

Область под ограничительными линиями указывает на энергию упругой деформации, требуемую для растяжения одного троса. На рисунке 8 указаны ее величины для растяжения троса на 105% и 150%.

Согласно предыдущим расчетам четырехместный боб,двигающийся со скоростью примерно 16 м/с, будет иметь 86,4 кДж кинетической энергии, которая для остановки боба должна быть преобразована

в энергию упругой деформации тросов. При разделении этой энергии на шесть тросов, каждый трос должен поглотить 14,4 кДж, что, как можно видеть на рисунке 8, превышает рекомендуемый рабочий диапазон для тросов диаметром 19 мм.

При подобных условиях эксплуатации тросов с напряжением на каждом, превышающим 15 000 Н, возникает изгиб улавливающей трубы, как показано на рис. 7б., с анкерными крючьями, реагирующими на нагрузки. Однако результаты простых расчетов изгиба стержня свидетельствуют о том, что максимальное напряжение при изгибе составляет только около 19 МПа; это напряжение недостаточно высоко для того, чтобы вызвать серьезные повреждения.

#### *Возврат улавливающей трубы на опорные блоки (положение P5 на рис. 1)*

Когда боб разворачивается и движется вниз по тормозному склону, улавливающая труба возвращается на опорные блоки. Хотя масса боба препятствует более быстрой отдаче растянутых тросов, кинетическая энергия улавливающей трубы в момент возврата преобразуется в энергию деформации; при этом возникающая в результате инерционная нагрузка вызывает изгиб трубы.

Количество данной энергии может быть определено с помощью уравнения (5), и при массе 2,3 кг и скорости возврата 15,9 м/с она равна 290 Дж.

Несмотря на то, что эта энергия имеет очень малую величину по сравнению с 86,4 кДж, которые требуется нейтрализовать для остановки боба, как показывает следующий анализ, она имеет очень большое значение.

Поскольку концы улавливающей трубы удерживаются опорными блоками, они выполняют функцию простых поддерживающих опор, и инерция быстро замедляющейся массы улавливающей трубы действует как распределенная нагрузка (Рис. 7с).

Таким образом, если проигнорировать массу вспомогательных деталей на улавливающей трубе, ее можно рассматривать как стандартную, поддерживаемую простыми опорами балку, несущую равномерно распределенную нагрузку.

В этом случае при распределенной нагрузке  $w$  и расстоянии между опорами  $L$ , переменная величина изгибающего момента может быть выражена как:

$$BM - \frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2} - \frac{w}{2}(Lx - x^2) \quad (7)$$

Теперь можно рассчитать энергию упругой деформации балки [1] при изгибе, используя следующее уравнение:

$$U = \int \frac{BM^2}{2EI} dx \quad (8)$$

Таким образом, общая энергия деформации поддерживаемой простыми опорами балки, несущей равномерно распределенную нагрузку, будет:

$$U = \frac{1}{2EI} \int \left[ \frac{w}{2}(Lx - x^2) \right]^2 dx \quad (9)$$

$$U = \frac{w^2 L^5}{240EI} \left[ -\frac{W^2 L^3}{240EI} \right] \text{ где общая нагрузка, } W = wL$$

Приравнивание потери кинетической энергии к увеличению энергии деформации балки дает:

$$\frac{1}{2}mV^2 = \frac{W^2 L^3}{240EI} \text{ где } W - \text{динамическая масса (} -ma \text{),} \quad (10)$$

Получается уравнение  $\frac{1}{2}mV^2 = \frac{(ma)^2 L^3}{240EI}$

которое позволяет рассчитать величину торможения (отрицательно-го ускорения):

$$a = \sqrt{\frac{120V^2 EI}{mL^3}} \quad (11)$$

В пересчете на эффективную динамическую массу это будет:

$$W = \sqrt{\frac{120mV^2 EI}{L^3}} = 2V \sqrt{\frac{30mEI}{L^3}} \quad (12)$$

При подстановке числовых значений наружного диаметра, равного 50 мм, и внутреннего диаметра – 40 мм (т.е.  $I = 0.181 \times 10^6 \text{ мм}^4$ ), стальная улавливающая труба длиной 0,76 м ( $E = 200 \text{ ГПа}$ ) при скорости возврата боба 15,9 м/с будет иметь следующую динамическую массу:

$$W = \sqrt{\frac{120 \times 5.5 \text{ (kg)} \times 15.9^2 \text{ (m/s)}^2 \times 200 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)} \times 0.181 \times 10^6 \text{ (m}^4\text{)}}{0.76^3 \text{ (m}^3\text{)}}}$$

$$= 117300 \text{ N (117.3 kN)}$$

Это составляет около 12 тонн, при этом динамическая масса превышает массу неподвижного тела более чем в 2000 раз.

Что касается напряжения при изгибе, для поддерживаемой простыми опорами балки, несущей равномерно распределенную нагрузку, максимальное напряжение для трубы с наружным диаметром  $d$  будет:

$$\sigma = \frac{wL^2 d}{16I} = \frac{WLd}{16I} \text{ относительно общей массы } W \quad (13)$$

Таким образом  $\sigma = \frac{Ld}{16I} \sqrt{\frac{120mV^2 EI}{L^3}} = \frac{dV}{8} \sqrt{\frac{30mE}{IL}}$  (14)

Подставив численные значения вышеуказанных параметров улавливающей трубы, получается:

$$\sigma = \frac{0.05 \text{ (m)} \times 15.9 \text{ (m/s)} \sqrt{30 \times 5.5 \text{ (kg)} \times 200 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}}}{8 \sqrt{0.181 \times 10^6 \times 0.76 \text{ (m}^3\text{)}}}$$

$$= 1342 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \text{ (1342 MPa)}$$

Данное напряжение значительно превышает предел текучести и объясняет тот факт, почему стержень часто искривляется и требует ремонта.

Как показывает уравнение (14), уменьшение массы приводит к снижению напряжения изгиба при ударе, но уменьшение массы достигается главным образом за счет сокращения размеров. Поэтому для оптимизации конструкции целесообразно выразить уравнение (14) с учетом основных размеров и свойств материалов. Улавливающая труба в основном представляет собой тонкостенный цилиндрический брус, поэтому по отношению к ней можно использовать следующие приближенные выражения массы:  $m \approx \pi d t L \rho$  и  $I \approx \pi d^3 t / 8$ . При подстановке этих выражений в уравнение (14), получается

$$\text{Напряжение при изгибе} = \sigma = \frac{dV}{8} \sqrt{\frac{30(\pi d t L \rho) E}{(\pi d^3 t / 8) L}} = V \sqrt{\frac{15}{4} \rho E} \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает, что для того чтобы снизить напряжение при изгибе в улавливающей трубе, возникающее в результате инерционной нагрузки при ударе, следует либо увеличить наружный диаметр трубы, либо снизить скорость при соударении.

Оно также указывает на целесообразность применения более легкого материала меньшей плотности и с более низким модулем упругости.

### **Обсуждение**

В настоящем исследовании рассматривались три основных этапа функционирования системы торможения боба:

1. Захват улавливающей трубы (к которой крепятся высокопрочные тросы).
2. Остановка боба (при полном растяжении тросов).
3. Возврат улавливающей трубы на опорные блоки.

Несмотря на то, что захват и возврат улавливающей трубы имеют одинаковые показатели скорости и количества передаваемой энергии, этап возврата связан с гораздо более высокой опасностью повреждения тормозной системы.

Это происходит потому, что опорные блоки гораздо слабее удерживают улавливающую трубу (из-за значительного расстояния между ними) по сравнению с анкерными крючьями, которые имеют более централизованное расположение между тросами. Хотя на практике обычно сложно изменить положение опорных блоков, расстояние между ними следует снизить до минимума, при этом также важно предусмотреть определенную систему амортизации для защиты улавливающей трубы от воздействия суммарного объема энергии, которому она подвергается при соударении (рис. 9).



*Рисунок 9. Улавливающая труба внутри модифицированного опорного блока*

Высокое напряжение тросов, наблюдаемое при остановке боба, не вызывает опасного изгиба улавливающей трубы, однако испытываемые ими нагрузки значительно превосходят рекомендуемый диапазон рабочих нагрузок для эластичных тросов данного размера. Отсюда следует, что для распределения данного объема нагрузки необходимо использовать либо более мощные тросы, либо тросы большего диаметра.

### **Выводы**

*Описываемая и изучаемая в рамках настоящего исследования тормозная система не соответствует поставленным целям.*

Применяемые эластичные тросы не пригодны для работы в столь тяжелом режиме, улавливающая труба и опорные блоки также требуют модификации для обеспечения их более эффективного функционирования на этапе выведения из зацепления.

При этом необходимо либо увеличить прочность улавливающей трубы, либо изолировать ее от воздействия полного объема энергии во время удара, особенно при возврате на опорные блоки.

Этого лучше всего достичь, используя или амортизационный материал для опорных блоков, или установив их на амортизирующих буферных опорах.

Эластичные тросы диаметром 19 мм испытывают сильную перегрузку при остановке как двухместного, так и четырехместного боба.

Для устранения этой проблемы следует либо использовать более прочные тросы большего диаметра и большей исходной длины, либо значительно увеличить количество тросов.

1. Case J, Chilver L, Ross C. Strength of materials and structures. 3rd ed. Berlin: Edward Arnold; 1993.
2. Anon. The British Bobsleigh Association [online] <<http://www.british-bobsleigh.com/talent.html>>.
3. Anon. Bobstart and Beach, Groningen [online] [http://www.bobstart.com/engelse\\_site/index.html](http://www.bobstart.com/engelse_site/index.html)>.
4. BS 3F 70:1991. Specification for heavy duty braided rubber cord. BSI.
5. Ibex Whitely. Mechanical properties of heavy duty elastic cords to BS3F70:1991.

---

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ РУЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ИЗГИБОВ ЛЕЗВИЙ КОНЬКОВ И ПОЛОЗЬЕВ БОБСЛЕЙНЫХ САНЕЙ

---

*Optimization of handheld gauge sizes for rocker measurements of skate blades and bobsleigh runners*

*Louis Poirier, Sean Maw, Darren Stefanynshyn, Robert I. Thompson*  
(*Sports Engineering*, – 2009, – Volume 11, – № 4, – pp. 201-206)

По самой своей сути результативность в видах спорта, предполагающих использование лезвий коньков или полозьев саней, зависит от взаимодействия металлического лезвия или полоза со льдом.

Модификация оборудования в значительной степени обуславливает фрикционное взаимодействие между металлом и льдом, оказывая тем самым влияние на результативность, особенно в тех видах спорта, в которых она определяется временем прохождения дистанции. По этой причине высококвалифицированные бобслеисты и саночники затрачивают значительное количество времени и усилий на оптимизацию своего оборудования [1–3].

Был опубликован ряд исследований, посвященных влиянию материалов, из которых изготавливаются полозья [4], но большей частью результаты исследований в области бобслея и санного спорта представляют собой «секрет фирмы» ведущих спортсменов, которым они не делятся с конкурентами.

Последние изменения правил, действующих в этих видах спорта [5], ограничивают возможности конструирования полозьев одним стандартизированным видом стали. Поэтому в настоящее время все усилия в области разработки новых полозьев фокусируются на модификации их контура.

Одна из задач проводимых исследований заключается в расширении знаний о механизмах взаимодействия льда и металлических полозьев, прежде всего, в бобслее. В настоящее время идет разра-

ботка термодинамической модели, которая позволит рассчитывать коэффициент трения между металлом и льдом с учетом физических свойств полозьев и состояния льда. *В основе данной модели лежит расчет динамического коэффициента трения путем определения равновесного положения полоза на поверхности льда, силы «пропахивания» льда, а также сдвигающей силы, вызываемой тонкой пленкой жидкости между полозом и льдом.* Она также позволит осуществлять моделирование термодинамических процессов, которые влияют на толщину данной пленки.

Понимание того, что строение полоза оказывает значительное влияние на результативность как в реальных условиях бобслейного спуска, так и в расчетах, выполняемых с помощью создаваемой модели, послужило стимулом для составления каталога различных контуров полозьев.

*Данная работа посвящена* оценке эффективности прибора, применяемого для анализа полозьев, а также возможности его применения в других ледовых видах спорта.

Для этой цели был выбран прибор, который может применяться во время соревнований в любой части света. *Данный прибор представляет собой модифицированную версию измерителя изгибов лезвий, применяемого в конькобежном спорте.*

Изгиб измеряется радиусом кривизны вдоль плоскости лезвия или степенью закругления плоскости лезвия в продольном направлении. Чем больше величина изгиба, тем более плоской будет поверхность полоза.

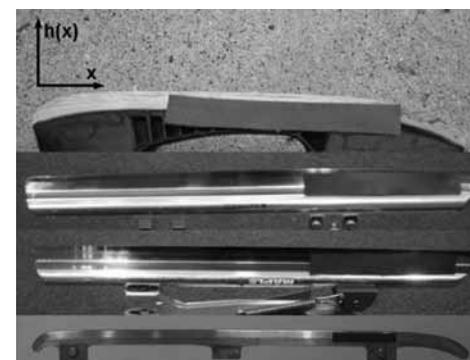
Применение прибора, разработанного для конькобежного спорта, в бобслее привело к возникновению идеи оптимизации размеров прибора для каждой дисциплины. Проектирование данного прибора представляет собой компромисс между пространственным разрешением, расстоянием, в пределах которого могут быть разрешены изменения контура, и разрешающей способностью при измерении изгиба. Поэтому данный измеритель будет обладать наибольшей достоверностью для определенного диапазона показателей изгиба.

Поскольку в основе анализа лезвий или полозьев, используемых в каждой дисциплине, будут лежать разные требования, резонно предположить, что понадобится разработать свои собственные измери-

тельные приборы с учетом особенностей саней используемых в разных видах спортивных специализаций.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с оптимизацией размеров измерителя для четырех спортивных дисциплин с использованием данных о реальных контурах лезвий или полозьев и цифровых методов оптимизации.

Контур  $h(x)$  определяется как высота плоскости полоза или лезвия в виде функции положения вдоль длины лезвия (рис. 1). Для исследования влияния контуров лезвия или полоза на результативность необходимо проведение точных измерений этих контуров, как в лабораторных условиях, так и в местах проведения спортивных соревнований во всем мире. Для этой цели конькобежцы используют портативный ручной измеритель изгибов лезвий, показанный на рисунке 2.



*Рисунок 1. Контуров четыре типа лезвий/полозьев, изучаемые в данном исследовании (сверху вниз: лезвия коньков, используемых в хоккее, конькобежном спорте (шорт-треке) на короткой и длинной дорожках и полозья боба). В качестве шкалы сравнительной оценки на каждой фотографии применялась одна и та же 15-сантиметровая калибровочная полоска*

Изгиб не измеряется непосредственно; он рассчитывается на основании показателей, измеренных с помощью данного прибора. Это показатели измерения кривизны лезвия/полоза в трех разных точках. Прибор имеет два штифта, зафиксированных на каждом его конце с расстоянием  $2a$  между ними.



Рисунок 2. Один из этапов сбора данных на полозе бобслейных саней

Эти штифты прикладываются к поверхности лезвия. На полпути между двумя штифтами микрометр измеряет отклонение  $g(x)$  относительно ровной линии, соединяющей оба штифта.

Измерители данного типа в настоящее время используются в конькобежном спорте на коротких (шорт-трек) и длинных дорожках и поставляются, как минимум, тремя компаниями: Maple (<http://www.mapleskate.com/>), Marchese (<http://www.marcheseracing.com/>) и Shoei Creations (<http://shoeicreations.com/>).

В принципе подобный прибор может также применяться в бобслее и хоккее. Однако, поскольку радиус кривизны лезвий/полозьев значительно отличается во всех этих видах спорта (хоккей 5–6 м, короткая дорожка – 6–12 м, длинная дорожка – 18–30 м, бобслей – 10–150 м), была сформулирована гипотеза, заключающаяся в том, что для каждой дисциплины следует также использовать измеритель разного размера.

Несмотря на применение измерителей изгиба в конькобежном спорте, как на коротких, так и на длинных дорожках, в настоящее время в продаже имеется только один единственный измеритель с  $1/2$  ширины  $a$  – 50 мм.

В скелетоне изгиб полоза можно изменить просто путем оказания давления на полоз. Однако в четырех исследуемых нами дисциплинах используются лезвия/полозья, контуры которых не могут быть легко изменены.

В бобслее полозья вырезаются по шаблону, и в идеале их лучше не изменять. Полировка полозьев выполняется вручную при многократном применении наждачной бумаги различной зернистости.

Если рассмотреть полоз по всей длине сверху вниз, то можно обнаружить, что по ширине полоз перекрывается выпуклой поверхнос-

тью с радиусом не менее 4 мм для мужской двойки и 6 мм для мужской четверки.

Ширина полируемой поверхности не приводит к значительному изменению контура полоза. Однако с течением времени и после многочасовой эксплуатации контур может меняться по сравнению со своим первоначальным состоянием. При этом спортсмены не предпринимают никаких усилий для сохранения исходного контура. Более того, поскольку при изготовлении полозьев часто копируют их комплект на санях, с помощью которых достигались наиболее успешные результаты, отклонения, возникшие с течением времени, могут быть воспроизведены в новом комплекте полозьев.

Типичный пример данных измерения полоза боба с помощью ручного измерителя показан на рисунке 3. Эти данные могут послужить иллюстрацией изменений контура полозьев, упомянутых в предыдущем абзаце. В данном случае изгиб в середине полоза сохраняет в основном постоянный уровень.

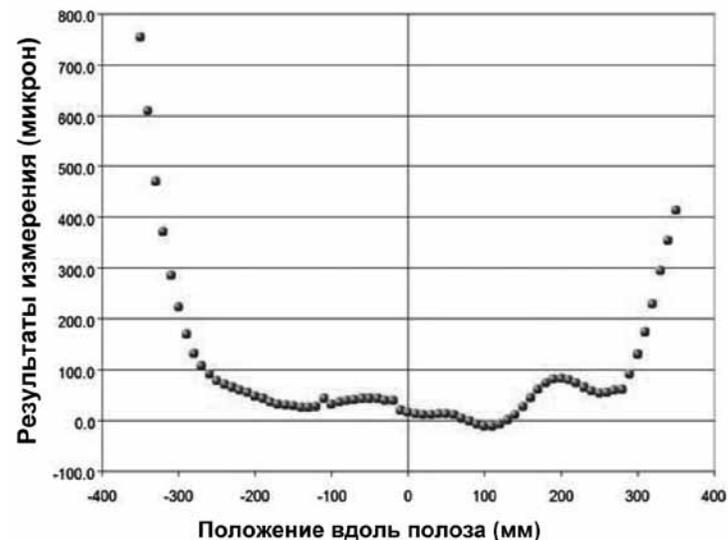


Рисунок 3. Результаты измерений заднего полоза одного из двух видов полозьев для мужской двойки, утвержденных ФИБТ (Международной федерацией бобслея и тобогана)

Исключение составляют более плоский участок вблизи 100-мм отметки, который сопровождается областью менее значительного изгиба, или более значительная величина измерений в 200 мм позиции. Это классический пример изменения контура с течением времени, которое затем было воспроизведено при изготовлении нового комплекта полозьев.

Лезвия для скоростных коньков затачиваются путем помещения пары лезвий в зажимное устройство параллельно друг другу, так чтобы скользящие поверхности лезвий находились сверху. Затем гладкие алмазные или наждачные точильные бруски двигают взад-вперед вдоль длины лезвий для полировки беговых поверхностей и формирования ровной кромки с углом  $90^\circ$ .

Симметрия лезвий и согласованность применяемых к ним при заточке сил по всей длине лезвия очень важны для качественной заточки, не изменяющей контур или изгиб лезвия.

Для формирования/регулировки изгиба лезвий (балансировки) применяется аналогичный процесс с той разницей, что теперь при заточке прилагаются разные силы на разных отрезках длины лезвия. Например, более сильная полировка на одном отрезке лезвия сделает его более плоским при одновременном закруглении прилегающих к нему участков. Все работы по заточке и формированию изгиба выполняются вручную.

Лезвия хоккейных коньков затачиваются и балансируются при обработке одного конька за один раз, при этом точильщик держит ботинок и прижимает лезвие к вращающемуся точильному кругу. *Степень изгиба лезвий обычно не контролируется, и в результате они часто отличаются у двух коньков из одной пары.* В отличие от плоского контура беговой поверхности лезвий коньков, применяемых в конькобежном спорте, лезвия хоккейных коньков имеют желоб, так что, находясь в вертикальном положении, хоккеист в основном скользит на двух кромках каждого лезвия.

*Следует отметить, что наиболее точный метод заключается не в использовании ручного измерителя изгиба, а в непосредственном измерении контура лезвия/полоза.*

Однако непосредственное измерение контура требует применения довольно громоздкого и дорогостоящего прибора с очень жесткими

конструктивными ограничениями. В состав подобного прибора входит микрометр, который может передвигаться по всей длине лезвия. Но поскольку полозья боба длиннее лезвий коньков, имеющийся прибор не годился для их измерения. В связи с этим был использован другой прибор, пригодный для анализа полозьев боба, который был куплен в магазине аппаратуры для прецизионной обработки, и с его помощью оказалось возможным получить ограниченное количество преобразованных в цифровую форму контуров лезвий для применения в настоящем исследовании.

Однако для составления каталога данных в лабораторных условиях и в местах проведения спортивных соревнований был использован специально адаптированный (модифицированный) для этой задачи ручной измеритель, применяемый в конькобежном спорте.

Процесс модификация состоял в простом удалении фланца, предназначенного для закрепления прибора на боковой поверхности лезвия конька, поскольку данный фланец блокировал движение микрометра по более широко закругленным полозьям боба.

Для спортсменов, выезжающих на соревнования, размеры и стоимость прибора для непосредственного измерения полозьев, делают его неудобным для практического применения.

*Следовательно, существует насущная необходимость в приспособлении ручного измерительного прибора, широко используемого в конькобежном спорте, к измерению изгибов полозьев боба и лезвий хоккейных коньков.*

Анализ ручного измерительного прибора, имеющий целью оптимизацию его размеров, начинается с непосредственного измерения контура при допущении, что данный цифровой контур является реальным лезвием или полозом, который мы хотим воссоздать. На основе этого цифрового контура моделируются данные измерительного прибора, используя распределение Гаусса для получения неопределенности, сопоставимой с неопределенностью измерений, которая наблюдается на практике при применении реального ручного измерительного прибора. Затем используются смоделированные данные измерительного прибора для многократного воссоздания контура от центра полоза или лезвия до каждого его конца.

На конечном этапе выполняется сравнение реконструированного контура с результатами измерения исходного контура.

В связи со случайным характером неопределенности процесс был автоматизирован, так чтобы его можно было бы повторить 1000 раз и затем усреднить для каждой ширины измерителя.

### Анализ контура

Исследуемый ручной измеритель позволяет осуществлять измерение кривизны на протяжении всей длины лезвия конька или полоза боба. На рисунке 4 показан процесс расчета величины изгиба на основе измерений, сделанных этим прибором.

После фиксации двух наружных точек микрометр определяет показатель  $g(x)$  в середине. Прибор имеет половину ширины  $a$ . Следует отметить, что кривизна, показанная на рисунке 4, является преувеличением; в действительности  $a/R \sim 10^{-2}$ , и данный способ хорошо работает при очень малых углах.

Предположение, состоящее в том, что работа ведется с малыми углами (уравнение 1) позволяет рассчитать данные измерителя  $g(x)$  на основе известного контура  $h(x)$ ;  $\delta$  — обозначает неопределенность измерений; его значение находится в пределах  $\pm 5\sigma$ , и оно соответствует нормальному распределению.

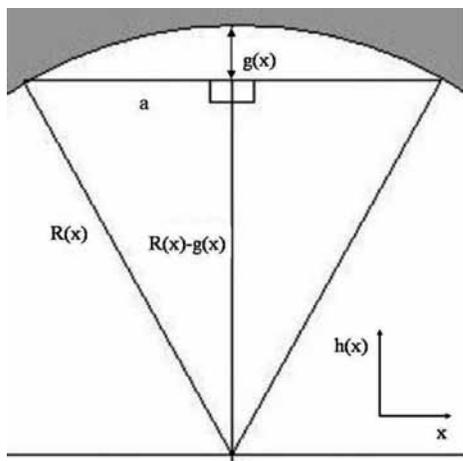


Рисунок 4. Изображение измерений изгиба, выполняемых с помощью ручного измерителя

Показатель  $\sigma$  представляет собой стандартное отклонение данных измерителя, как это наблюдается на практике. Неопределенность, наблюдаемая на практике, очевидно, является постоянной для большинства показателей  $g(x)$ .

Однако она увеличивается для очень больших значений  $g(x)$ , которые могут наблюдаться на концах лезвий. Ради простоты в настоящем исследовании применяется постоянное значение  $\sigma$  для каждого моделирования.  $x$  — это горизонтальное положение точки измерения микрометром на лезвии или полозе.

$$g(x) = h(x) - \frac{h(x+a) + h(x-a)}{2} + \delta. \quad (1)$$

Для дальнейшего использования данных измерителя было сделано допущение, что радиус кривизны в пределах заданной ширины измерителя равен постоянной величине  $R(x)$ . Это позволило вывести уравнение 2:

$$R(x) = \frac{a^2 + g^2(x)}{2g(x)}. \quad (2)$$

Чем больше ширина полосы измерителя, тем больше величина измерений и, следовательно, тем меньше относительная неопределенность показателей  $g(x)$ . Однако повышенная ширина также приводит к более значительной потере информации в результате низкочастотного фильтрования [6] в связи с допущением постоянного радиуса. Эта альтернатива постоянно присутствует при подобных расчетах, и путем оптимизации размера измерителя необходимо постараться снизить общую потерю информации из обоих источников.

### Реконструкция контура

Реконструкция нового контура  $h_c(x)$  представляет собой итеративный процесс, который требует сравнения последовательных измерительных точек. Чтобы воспроизвести пространственное разрешение  $\Delta x$  данных, полученных с применением ручного измерителя изгиба, мы преобразовали уравнение 1, убрав из него неопределенность из-

мерения и заменив  $1/2$  ширины измерителя  $a$  на  $\Delta x$ . Это позволило вывести уравнение 3.

$$g_{\Delta x}(x) = h_r(x) - \frac{h_r(x + \Delta x) + h_r(x - \Delta x)}{2} \quad (3)$$

В конькобежном спорте измерения с помощью исследуемого измерителя производятся путем его непрерывного перемещения по всей длине лезвия, и в настоящем исследовании мы применяли аналогичную процедуру при измерении изгибов лезвий хоккейных коньков.

Пространственное разрешение  $\Delta x$  представляет собой расстояние вдоль лезвия, которое разделяет различные показатели измерений. В связи с тем, что целью являлось составление каталога данных, и, учитывая тот факт, что полозья бобслея значительно длиннее лезвий коньков, были выполнены дискретные измерения в заданных точках на поверхности полоза. В этом случае  $\Delta x$  является расстоянием между измерениями. Для упрощения алгоритма реконструкции был выбран  $\Delta x$  как целночисленный аналог половины ширины измерителя  $a$ . Проанализировав изображение на рисунке 4, можно прийти к заключению, что уравнение 3 может также быть записано в виде уравнения 4:

$$g_{\Delta x}(x) = R(x) - \sqrt{R^2(x) - (\Delta x)^2} \quad (4)$$

Теперь, уравнив уравнения 3 и 4, получим уравнение 5:

$$\begin{aligned} h_r(x) - \frac{h_r(x + \Delta x) + h_r(x - \Delta x)}{2} \\ = R(x) - \sqrt{R^2(x) - (\Delta x)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

На данном этапе уравнение 5 может быть трансформировано в переднее или заднее рекурсивное отношение, которые оба представлены в уравнении 6:

$$\begin{aligned} h_r(x \pm \Delta x) = 2h_r(x) - h_r(x \mp \Delta x) \\ - 2 \left( R(x) - \sqrt{R^2(x) - (\Delta x)^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

После того как были получены данные измерителя  $g(x)$  для всей длины полоза, был сделан вывод, что реконструкция контура  $h_r(x)$  на основе результатов измерения изгиба является интеграцией второго порядка.

Следовательно, она требует двух вводов данных, как и констант интегрирования, задающих положение и ориентацию полоза в пространстве. Было введено равенство  $h_r(-\Delta x) = h_r(\Delta x) = 0$ , которое устанавливает на ноль положение и наклон лезвия в центре. Тогда можно решить уравнение 6 при  $x = 0$ , как показано в уравнении 7:

$$h_r(0) = R(0) - \sqrt{R^2(0) - (\Delta x)^2} \quad (7)$$

Теперь имеется вся необходимая информация для итеративного расчета контура полоза от центра и до конца каждого конца с применением уравнения 6.

### Сравнение контуров

По окончании реконструкции оба контура  $h(x)$  и  $h_r(x)$  должны быть переориентированы, так чтобы они накладывались друг на друга для их непосредственного сравнения.

При этом можно было бы просто откорректировать первоначальный контур в соответствии с равенством  $h_r(\Delta x) = h_r(-\Delta x) = 0$ , для чего потребовалось бы уделить повышенное внимание совмещению центра контура.

В данной работе наложение контуров было сбалансировано по всей их длине с применением линейной регрессии обоих контуров и повторной ее корректировки для установки на ноль наклона и пересечения каждого контура.

После совмещения ориентации обоих контуров можно выполнить их сравнение, применяя  $a$  – меру точности реконструкции, основанную на типе измерения, используемом в статистике хи-квадрат. Основная разница между данным тестом и истинным критерием хи-квадрат состоит в неопределенности.

Поскольку отсутствует действительная неопределенность измерительных точек исследуемого контура, была использована  $\sigma$ . Это стандартное отклонение, зарегистрированное для экспериментальных результатов измерений, и та же самая величина применялась для расчета  $\delta$ .

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(h(x_j) - h_r(x_j))^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

В связи со случайным характером неопределенности процесс повторяется 1000 раз, и для окончательного анализа используются усредненные показатели  $a$ . Минимизация  $a$  происходит, когда обе кривые совпадают в наибольшей степени.

### Результаты и обсуждение

Ширина измерителя оптимизируется путем получения цифрового контура, минимизации среднего значения  $a$  для разных контуров каждого типа лезвий/полозьев и усреднения результата.

В таблице 1 представлены некоторые результаты расчетов усредненных показателей  $a$  для пяти пар лезвий коньков для конькобежного спорта на длинной беговой дорожке. Следует отметить, что хотя в таблице 1 представлены только некоторые типичные данные как пример результатов этих расчетов, полученные в процессе исследований дополнительные данные, которые не были здесь показаны, имеют те же самые средние показатели, как и данные из таблицы 1.

Данные представленные в таблице 1 рассчитаны при пространственном разрешении  $\Delta x = 5$  мм и стандартном отклонении данных измерителя  $\sigma = 1,5$  мкм.

Таблица 1. Оптимизация величины половины ширины измерителя изгиба семи разных лезвий коньков на основе минимизации значений  $a$

$a$ (mm)	1	2	3	4	5	6	7
30	1.70	1.58	2.18	2.07	1.44	3.00	2.40
35	1.03	0.90	1.70	1.74	0.84	2.47	1.75
40	0.71	0.61	1.50	1.64	0.57	<b>2.36</b>	1.44
45	0.62	0.48	<b>1.45</b>	<b>1.63</b>	0.39	2.47	1.31
<b>50</b>	<b>0.60</b>	0.37	1.51	1.82	0.35	2.77	1.21
55	0.62	0.34	1.64	2.13	<b>0.33</b>	3.12	<b>1.13</b>
65	0.64	<b>0.30</b>	2.46	3.26	0.44	4.28	1.39
70	1.02	0.69	4.93	7.27	1.00	5.57	6.37

*Жирным шрифтом выделены минимальные значения*

Для полного анализа каждого размера измерителя было составлено множество подобных таблиц, которые охватывают широкий спектр параметров.

При проведении этого расширенного анализа рассматривались пространственные разрешения в диапазоне от 3 до 10 мм для трех типов лезвий коньков, 10–25 мм – для полозьев боба и стандартные отклонения от 1 до 2 мкм для всех измерений.

Возможно, данное пространство параметров полностью включает в себе неопределенность данных параметров. Однако, вероятно, существует возможность сузить данную неопределенность путем рассмотрения большего количества лезвий или полозьев.

Настоящие исследования позволили выявить оптимальные для вышеуказанного пространства параметров размеры измерителя для выполнения анализа лезвий хоккейных коньков, лезвий коньков для конькобежного спорта на коротких и длинных беговых дорожках, а также для полозьев боба. Эти результаты обобщены в таблице 2.

### Выводы

Ручной измеритель изгибов является очень полезным инструментом анализа лезвий в конькобежном спорте. Результаты настоящего исследования позволяют предположить, что подобный измерительный прибор может также применяться в хоккее и бобслее.

Таблица 2. Размеры ручного измерителя изгибов, рекомендуемые для снижения потерь информации при его применении

Тип лезвия	1/2 ширины измерителя (мм)
Хоккей	10 ± 3
Шорт-трек (короткая дорожка)	25 ± 5
Длинная дорожка	50 ± 10
Бобслей	50 ± 20

В целях минимизации потери информации по причине разрешения микрометра и низкочастотного фильтрования был использован численный анализ, что позволило оптимизировать размеры измерителей изгибов для всех четырех дисциплин.

Реализуемый в настоящее время в торговле измеритель, 1/2 ширины которого составляет 5 см, позволяет осуществлять эффективные измерения в конькобежном спорте на длинной дорожке, однако, для шорт-трека рекомендуется использовать прибор, имеющий наполовину меньший размер.

Для анализа бобслейных полозьев был применен модифицированный прибор размером 5 см, что свидетельствует о том, что измеритель такого размера может быть с успехом использован для решения подобной задачи.

Было также обнаружено, что измеритель с 1/2 ширины, равной 1 см, является оптимальным для анализа лезвий хоккейных коньков, хотя нельзя не признать тот факт, что некоторые виды лезвий/полозьев по-разному функционируют в определенных условиях (например, в условиях жары или холода).

1. Rathburn S (1998) *CNC Machining* 2(6):14.
2. Bromley K (1999) *Factors affecting the performance of skeleton bobsleds*. PhD Thesis, University of Nottingham.
3. Renishaw (2007) *Manufacturing talk* (May 28), rea447.
4. Itagaki K, Huber NP, Lemieux GE (1987) *J Phys Colloq* 48(3):C1–297.
5. Congress FIBT (2007) *International rules—Bobsleigh*, Chap 10, pp 19–22.
6. Blinichikoff HJ, Zverev AI (1976) *Filtering in the time and frequency domains*, Chap 3. Wiley, New York, pp 79–152.

# УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ МЕЖДУ СТАЛЬЮ И ЛЬДОМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛОЗЬЕВ ДЛЯ БОБСЛЕЙНЫХ САНЕЙ

*The Effect of Pressure on Friction of Steel and Ice and Implementation to Bobsleigh Runners*

*Melanie Dumm, Christian Hainzmaier, Stephan Boerboom and Erich Wintermantel (The Engineering of Sport, – 2006, – № 6, – pp. 103-106)*

## Материалы и методы Испытательный стенд

Для трибологических исследований трения стали и льда применялся испытательный стенд Tribo Disc (рис. 1). Он функционирует в климатической камере, температура внутри которой регулируется от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+15^{\circ}\text{C}$ .

В основе работы испытательного стенда лежит принцип «штырь-на-диске» («pin-on-disc»), когда образец неподвижно фиксируется на вращающемся диске. Образец движется по льду по спиральной дорожке, при этом проходимое им расстояние может составлять 240 м. Относительная скорость образ-



Рисунок 1. Испытательный стенд Tribo Disc



Рисунок 2. Приемник образца

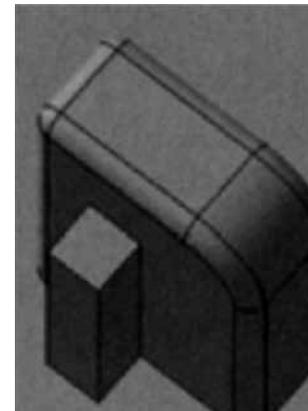


Рисунок 3. Образец

ца может устанавливаться в пределах между 0,1 и 30 м/с.

В процессе каждого отдельного теста относительная скорость поддерживается на постоянном уровне. Действующая на образец нормальная (вертикально направленная) сила изменяется в зависимости от веса, устанавливаемого в верхней части его приемника (рис. 2). Поверхность льда подготавливается с помощью фрезы для льда, подобной тем, которые применяются на бобслейных трассах.

## Образец

Образец имеет стандартизованную геометрию и площадь контакта с поверхностью льда, равную  $32\text{ мм}^2$ . Поверхность скольжения полируется до шероховатости 1 мкм. По этой причине влияние структуры поверхности скольжения является незначительным.

## Измерительное устройство

Для измерений силы трения и нормальной силы применяется измерительное устройство, изготовленное на основе использования тензодатчиков, размещаемых таким образом, что обе силы могут измеряться одновременно или по отдельности.

Результаты измерений передаются на регистратор данных, который может записывать все показатели данного цикла измерений под одной временной отметкой. Частота записи информации составляет 50 Гц.

## Результаты

Была проведена серия испытаний с применением образцов из стали и из закаленной стали при температурах  $-2^{\circ}\text{C}$  и  $-15^{\circ}\text{C}$  (рис. 4,5,6,7).

Для получения непрерывного графика  $\mu$ - $r$  во время испытаний осуществлялось поэтапное увеличение давления.

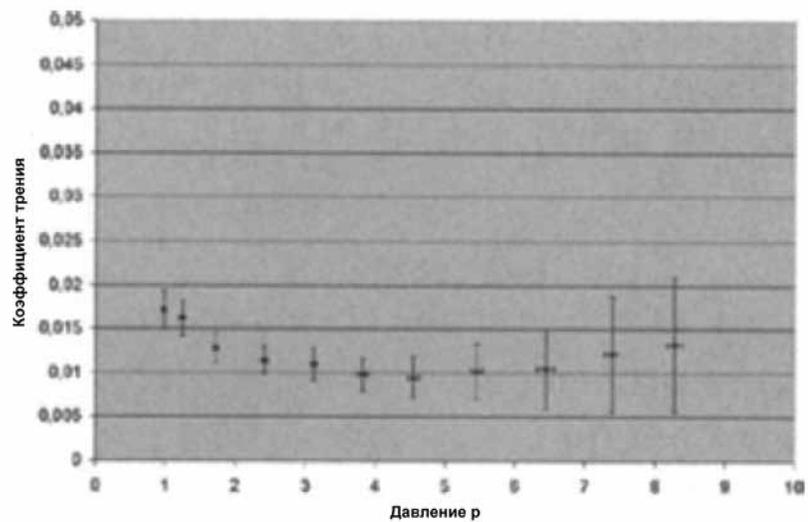


Рисунок 4. График  $\mu$ - $r$  для стали при  $-2^{\circ}\text{C}$

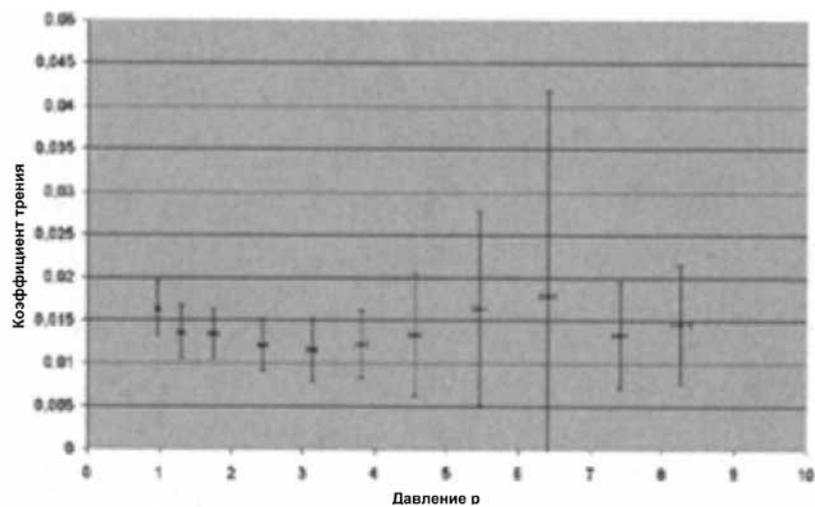


Рисунок 5. График  $\mu$ - $r$  для закаленной стали при  $-2^{\circ}\text{C}$

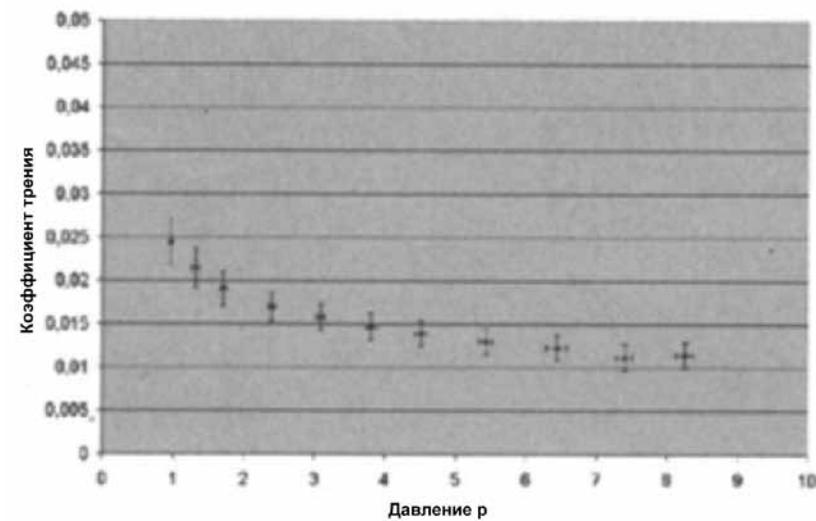


Рисунок 6. График  $\mu$ - $r$  для стали при  $-15^{\circ}\text{C}$

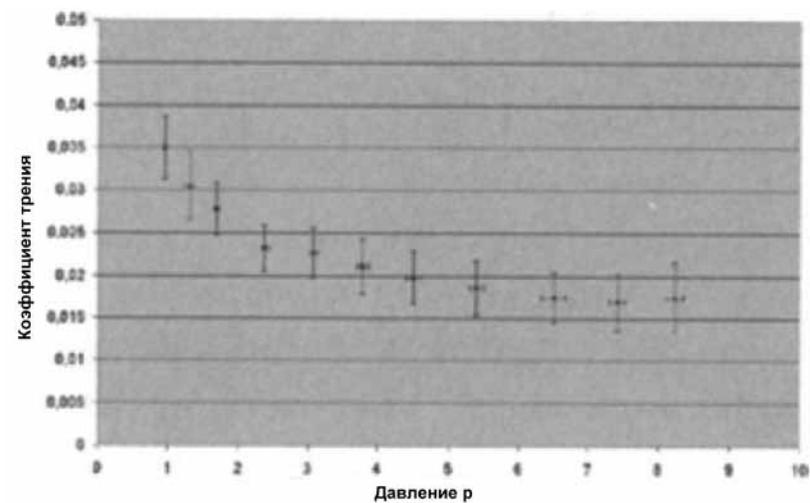


Рисунок 7. График  $\mu$ - $r$  для закаленной стали при  $-15^{\circ}\text{C}$

Основываясь на полученных данных в основном можно наблюдать у обоих образцов снижение коэффициента трения при увеличении давления.

Кроме того было продемонстрировано, что коэффициент трения зависит от температуры льда: в результате испытаний при  $-15^{\circ}\text{C}$  были получены более высокие коэффициенты трения, чем при  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Однако имеется очевидное различие в характеристиках графиков для  $-2^{\circ}\text{C}$  и  $-15^{\circ}\text{C}$ : при  $-2^{\circ}\text{C}$  четко наблюдается оптимум коэффициента трения для обоих образцов. В то же время при  $-15^{\circ}\text{C}$  коэффициент трения в конце выбранного нами диапазона давления все еще проявляет тенденцию к снижению.

Еще один интересный аспект заключается в различии свойств образца из стали по сравнению с образцом из закаленной стали.

### Обсуждение результатов исследований

Как продемонстрировали ранее проводимые исследования (Hainzmaier 2005, Voerboom Vienna 2005, Voerboom Belgrade 2005), снижение коэффициента трения сопровождается увеличением давления, а увеличение коэффициента трения – снижением температуры.

Оба эти эффекта были также подтверждены результатами проведенных экспериментов.

Однако в данном исследовании непрерывно возрастающее давление позволило описать характеристики коэффициента трения для сравнительно широкого диапазона давления в пределах одной процедуры проведения испытаний. *Благодаря этому удалось обнаружить оптимальное давление, обеспечивающее самые низкие потери при возникающем трении.*

В отличие от более ранних исследований Хайнцльмайера (Hainzmaier 2005), который предположил, что оптимальное давление снижается при низких температурах по причине того, что лед становится более ломким, в настоящем исследовании была выявлена тенденция повышения оптимального давления при понижении температур. Дальнейшее понижение температуры приводит к эффекту «вспахивания» и тем самым разрушению ледяной поверхности.

Этот разрушительный эффект может быть предотвращен путем повышения качества ледяной поверхности благодаря усовершенствованию технологии подготовки льда.

В настоящее время ледовая поверхность содержит меньшее количество воздушных пузырей, так что скольжение образца является более ровным.

Кроме того, в процессе проведения экспериментов было усовершенствовано измерительное устройство, что позволило достичь более высокой точности измерений.

Еще одним важным результатом проведенных исследований является определение влияния термической обработки на фрикционные свойства материалов. При этом термообработка стала причиной снижения коэффициента трения.

Для применения результатов этого исследования на практике с целью улучшения свойств полозьев боба, необходимо было узнать действительное давление, оказываемое на полз во время бобслейного спуска. По этой причине был использован высоко точный оттисковый материал для получения оттисков следов, оставляемых ползком на бобслейной трассе (Hainzmaier Ontario 2005).

Полученные оттиски анализировались с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ), и фактическое давление между ползком и льдом рассчитывалось на основе результатов РЭМ.

*При этом было выявлено, что боб движется при очень низком давлении на прямых участках и при очень высоком давлении на виражах, но никогда при оптимальном давлении, рассчитанном для самых низких потерь трения.*

Данный факт указывает на возможность оптимизации геометрических параметров полоза с учетом распределения давления по всей контактной поверхности.

В связи с влиянием термообработки на коэффициент трения существует высокий потенциал оптимизации полоза. Однако в этой области действуют строгие ограничения, установленные Международной федерацией бобслея и тобоггана. Начиная с 01.01.2006 г. запрещена любого рода термообработка полозьев.

Тем не менее, необходимо продолжить эти исследования в расчете на изыскание других возможностей практического применения полученных результатов.

1. Hainzmaier, C. (2005) *A new tribologically optimized bobsleigh runner*. Zentralinstitut für Medizintechnik, Technische Universität München.
2. Boerboom, S., Hainzmaier, C., Kraus, F., Wintermantel, E. (2005) *Tribologie im Stahl-Eis-Kontakt: Einfluss des Druckes*. DiversWorkshop 2005, Vienna.
3. Boerboom, S., Hainzmaier, C., Kraus, F., Wintermantel, E. (2005) *Effect of runner material on ice friction in bobsleigh*. 10th Annual Congress of the European College of Sports Science 2005, Belgrade.
4. Hainzmaier, C. (2005) *A method to study the surface friction using an impression material*. 62nd Eastern Snow Conference 2005, Ontario.

---

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ САННО-БОБСЛЕЙНЫХ ТРАСС И ПРОВЕРКА ИХ СООТВЕТСТВИЯ УСТАНОВЛЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ

---

*Design and Verification of Bobsleigh Track*  
Francesco Braghin, Federico Cheli, Stefano Melzi  
(Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems  
Design and Analysis ESDA2010, – 2010, Istanbul, Turkey)

Правила по бобслею имеют приложение, в котором изложены предписываемые характеристики бобслейных трасс. В частности, параграф 16.13 правил 2009-2010 гг. под заголовком «Центробежные силы» [1] содержит следующую формулировку: «Максимальное время действия центробежной силы порядка 4G не должно превышать 3 секунд. Максимальная дозволённая величина составляет 5G; действие данной центробежной силы не должно длиться более 2 секунд. Применение центробежной силы выше 5G не разрешается».

С учетом комментария в адрес составителей правил, которые перепутали ускорение и силу (следует отметить, что благодаря движению боба во время преодоления виража центробежная сила ощущается спортсменами как сжимающая сила (т.е. действующая перпендикулярно поверхности опоры), этот параграф служит единственным руководством для проектировщиков бобслейных трасс при расчете радиусов кривизны виражей: определив максимальное нормальное ускорение  $a_y$  и зная среднюю скорость боба  $v$  в заданной точке трассы, можно легко определить радиус кривизны виража с помощью уравнения:

$$R = \frac{v^2}{a_y} \quad (1)$$

С этим методом связаны два главных недостатка: в нем не учитываются характеристики переходного этапа, т.е. перехода между прямой трассой и движением на вираже и наоборот (вышеуказанный ме-

год является чисто стационарным), и скорость боба определяется на основе динамических характеристик боба, и потому известно только ее приближительное значение.

В связи с этим существует необходимость в разработке цифровых моделей боба и пилота в сочетании с цифровой моделью трассы.

В данной работе описывается *интегрированный метод* проектирования бобслейных трасс и проверки их соответствия установленным требованиям.

*Этот метод включает три основных компонента:* геометрическую характеристику трассы, многокомпонентную модель боба и цифровую модель пилота. Поскольку разработка и испытания моделей боба и пилота уже описывались в предыдущих публикациях, в центре внимания настоящего исследования находилась геометрическая характеристика трассы, самого упрощенного представления которой (одно поперечное сечение на каждые 50 м) оказалось более чем достаточно для точного прогнозирования максимальных нормальных ускорений и выбора правильного конструкторского решения уже на стадии проектирования.

#### **Система условных обозначений:**

- $R$  – средний радиус кривизны виража;
- $v$  – средняя скорость боба при преодолении виража;
- $ay$  – среднее центробежное ускорение боба во время преодоления виража;
- $q, r$  – полярные координаты;
- $x, y, z$  – декартовы координаты;
- $s$  – криволинейная координата;
- $C$  – кривизна трассы;
- $a$  – угол крена боба;
- $\delta$  – угол поворота руля;
- $m$  – масса боба;
- $g$  – гравитационное ускорение;
- $k_s$  – коэффициент усиления пропорциональности, который отражает быстроту реакции пилота;
- $\epsilon$  – ошибка траектории, т.е. расстояние между пунктом  $P_1$ , который боб достигнет через заданный интервал времени без изменения по-

ложения руля, и пунктом  $P_{\text{иг}}$  на идеальной траектории того же самого участка трассы;

- $t_0$  – фиксированный интервал времени;
- $l_0$  – визуальное расстояние;
- $x_{\text{Pиг}}$  – положение боба на идеальной траектории на исследуемом участке трассы в криволинейной системе координат;
- $x_{p1}$  – фактическое положение боба на том же участке трассы в криволинейной системе координат.

#### **Модель трассы**

Первым этапом оценки соответствия трассы правилам, принятым Международной федерацией бобслея и тобогана (FIBT), является создание геометрической модели данной трассы.

С точки зрения проектировщика эта задача не вызывает трудностей, так как ее можно решить с помощью разработки модели трассы при применении системы автоматизированного проектирования (САПР). С точки зрения определения соответствия уже готовой трассы установленным правилам выполнение этой задачи может потребовать много времени, поскольку точное определение трехмерных геометрических параметров трассы длиной более 1,5 км представляет собой непростую работу. В то же время при наличии уже готовой трассы гораздо легче выполнить непосредственные измерения нормального компонента ускорения во время движения по трассе.

Данное измерение, очевидно, может быть отнесено только к конкретному бобу, конкретным спортсменам и конкретному состоянию льда, но в случае участия в испытаниях спортсменов мирового уровня оно также может применяться для проверки соответствия правилам.

Если, с другой стороны, подобное измерение не может быть выполнено в связи с тем, что трасса еще не готова, или из-за отсутствия возможностей для выполнения измерений, то тогда потребуются реконструировать геометрию трассы на основе имеющихся в наличии данных.

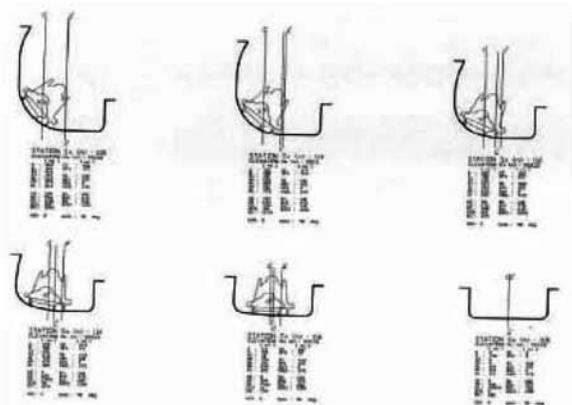
*Наиболее распространенным способом преобразования данных о геометрии трассы является распечатка изображений с конфигурацией различных участков вдоль трассы.*

В связи с этим был разработан числовой алгоритм, переводящий эти изображения в формат моделирования трассы в системе автоматизированного проектирования путем выполнения ряда следующих этапов:

1. Переведение изображений в цифровую форму.
2. Прореживание изображения.
3. Монтаж цифровых изображений.

### **Переведение изображений в цифровую форму**

Обычно данные о трассе представляются в виде изображений, как показано на рисунке 1. Для каждого участка трассы задается криволинейная координата (табличка под каждым изображением), чтобы суметь повторно позиционировать каждый из рассматриваемых участков вдоль трассы. Следует отметить, что расстояние от одного участка трассы до следующего является в основном переменным: обычно количество участков увеличивается при значительных изменениях трассы (например, на входе и выходе из виража).

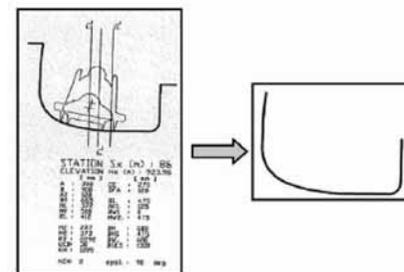


*Рисунок 1. Типичные изображения участков трассы*

Следует отметить, что почти для каждого участка показано наиболее целесообразное положение саней, и при этом изображения пересечены одной или несколькими вертикальными опорными линиями.

Эти линии являются графическим представлением центральной линии (CL), профильной линии (PL) и передней линии (FL) рассматриваемого участка.

Кроме того, под изображением каждого участка указаны его общие размеры, а также абсолютная координата его центра. Данная дополнительная информация переводится в цифровую форму, сохраняется в виде текста и используется в конце этапа цифрового кодирования.



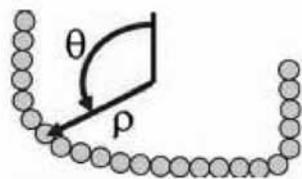
*Рисунок 2. Очистка профиля участка*

Перед преобразованием в цифровую форму профиль каждого участка автоматически «очищается», т.е. удаляется профильное изображение саней, опорные линии и таблица под изображением, а также не представляющие важности части участка (рис. 2).

Следует отметить, что перед удалением вышеупомянутых объектов, в качестве направляющих применяются внешние горизонтальные области участка для выполнения его автоматического разворота, если на стадии сканирования был выявлен поворот участка в нежелательном направлении.

Используя пакет прикладных программ MATLAB®, изображения затем преобразуются в матрицу из черно-белых пикселей и в таблицу полярной системы координат. Это выполняется путем помещения начала системы координат в центр изображения и преобразования целочисленных координат  $x$  черных пикселей в полярные координаты (рис. 3).

Рисунок 3. Преобразование исследуемого участка трассы из системы декартовых в систему полярных координат



Затем профиль рассматриваемого участка подразделяется на определенное количество кольцевых сегментов (60 для каждого участка), и для каждого сегмента сохраняется пиксел, имеющий наименьшие радиальные координаты. После этого полярные координаты выбранных пикселей преобразуются обратно в декартовы координаты в целях конвертирования пикселей в метры. Это выполняется с использованием информации, содержащейся в таблице под изображением участка: сначала на изображении определяется центр участка (относительная система координат), затем изменяется масштаб изображения (из пикселей в метры). Перед размещением участков в абсолютной системе координат производится прореживание изображения.

### Прореживание изображения

Расстояние между участками обычно оказывается недостаточным для обеспечения плавных переходов при имитации движения саней по исследуемой трассе. Поэтому необходимо прореживание между сгруппированными изображениями участков трассы с применением интерполяции линейными или кубическими сплайнами. Хотя само описание трассы может быть очень приблизительным (один профиль участка трассы на каждые 50 м), прореживание пикселей изображений посредством интерполяции кубическими сплайнами через каждые 0,5 м позволяет выполнять однородное динамическое моделирование. При менее приблизительном описании трассы достаточно проведения линейной интерполяции через каждые 0,5 м.

Следует отметить, что этап прореживания выполняется перед повторным позиционированием профилей участков в абсолютной системе координат. Её цель состоит в том, чтобы избежать разрывности: во время этапа монтажа профили участков не просто располагаются вдоль средней линии трассы, но также поворачиваются

вокруг вертикальной оси в целях получения проекции участка на плоскости  $xu$  перпендикулярно к проекции средней линии трассы на той же плоскости.

Таким образом, интерполяция участков на этом этапе может потребовать не только смещения точек участка внутри плоскости, но и поворота самого участка.

### Монтаж цифровых изображений

На заключительном этапе центр участка располагаются в абсолютной системе координат. К сожалению, центр каждого участка обычно задается исходя из высоты (подъема) и положения вдоль средней линии трассы (позиции). Поэтому возникает необходимость перехода от криволинейных к прямоугольным (декартовым) координатам.

Кривизна трассы обычно определяется методом пошагового вычисления линейной функции с соединяемыми точками, четко установленными на средней линии трассы. Поэтому для того, чтобы легко объединить преобразованные в цифровую форму изображения участков, достаточно сохранить в памяти компьютера криволинейные координаты соединяемых точек, а также показатели радиуса кривизны выражений.

Для перехода от описания трассы в криволинейной системе координат к ее описанию в декартовой системе координат применяются следующие уравнения:

$$ds = R d\theta \Rightarrow \theta(s) = \theta_0 + \int_{s_0}^s \frac{du}{R(u)} \quad (2)$$

$$\begin{cases} dx = ds \cos(\theta) \\ dy = ds \sin(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x(s) = x_0 + \int_{s_0}^s \cos(\theta(u)) du \\ y(s) = y_0 + \int_{s_0}^s \sin(\theta(u)) du \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, зная кривизну трассы  $C(s) = 1/R(s)$  как функцию криволинейных координат, можно определить положение средней линии трассы в абсолютной системе координат.

Для определения величины координаты средней линии трассы используются показатели, указанные в таблице под изображением каждого участка с учетом линейной интерполяции между участками.

В настоящее время существует возможность расположения цифровых изображений участков вдоль средней линии трассы с помощью простой операции перемещения и поворота профиля каждого участка в целях определения профиля трассы в абсолютной декартовой системе координат (рис. 4).

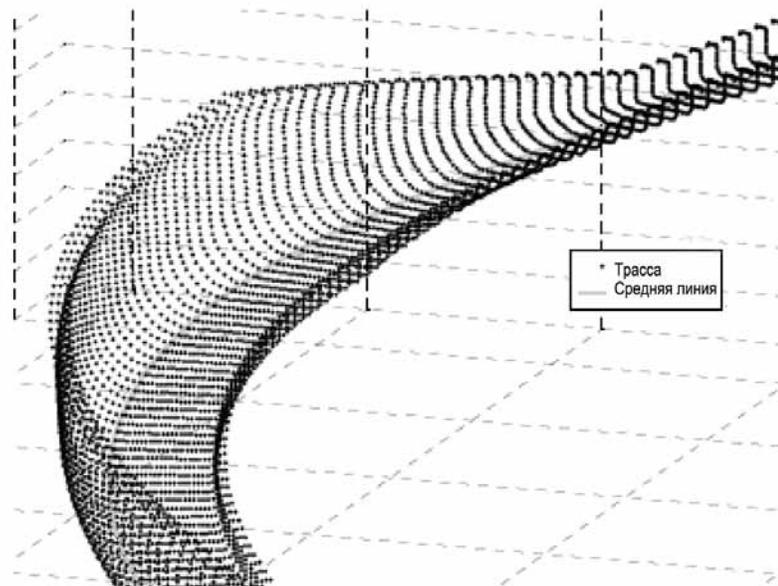


Рисунок 4. Монтаж участков трассы вдоль средней линии трассы

Следует отметить, что в идеале участки следует поворачивать не вокруг оси  $z$  абсолютной системы координат, а вокруг оси, перпендикулярной к уклону трассы. Однако уклон трассы обычно имеет неоднородности, которые могут послужить причиной возникновения значительных нефизических ударных сил в результате динамического моделирования боба.

## Модели боба, контакта с желобом трассы и пилота Модель боба

Рама спортивного боба конструируется таким образом, чтобы обеспечивать возможность выполнения ряда движений относительно друг друга различными деталями в целях улучшения способности саней к приспособлению к геометрическим характеристикам трассы и достижения оптимального контакта между полозьями и трассой [2].

Многокомпонентная модель, разработанная в программе SimMechanics, описывает динамику движения саней, осуществляемого посредством 9 твердых тел с общим числом степеней свободы, равным 15 (3, 4):

- 6 степеней свободы (ст. св.) для трехмерного перемещения задней рамы,
- 3 ст. св. для относительного движения между передней и задней рамами,
- 1 ст. св. для относительного угла наклона в поперечном направлении между передней рамой и рулевой рамой (угол поворота),
- 1 ст. св. для относительного движения качения между рулевой рамой и передней поперечиной,
- 4 ст. св. для 4 вертикальных смещений полозьев относительно главной рамы.

Для облегчения понимания значения каждой степени свободы, включенной в модель боба, далее приведено его описание.

Как показано на рисунке 5, главная рама делится на два подрамника, соединенных центральным стержнем, который обеспечивает относительное движение «качения» между передней и задней рамами; при этом, оба подрамника представлены в виде твердых тел.

Экспериментальные испытания продемонстрировали, что в исследуемых бобслейных санях центральный стержень не является идеальным цилиндрическим соединением, но обеспечивает значительные сдвиги в направлениях, перпендикулярных горизонтальной оси поворота в поперечной плоскости. Таким образом, для соединения двух рам применялось планарное соединение, позволяющее выполнять два относительных перемещения и один относительный поворот между обеими рамами. Реакция данного соединения вос-

производилась посредством пружин с линейной характеристикой, действующих в боковых и вертикальном направлениях и нелинейной торсионной пружины, влияющей на степень свободы относительно «качения», воспроизводя эффект бамперов.

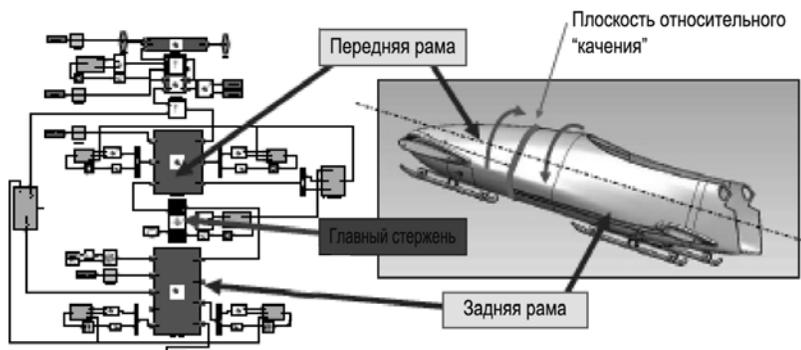


Рисунок 5. Схема передней и задней рамы, плоскость относительного «качения» и соответствующие блоки в схеме, выполненной в программе SimMechanics

Что касается рулевого механизма, то рулевая рама крепится к передней; соответствующая команда рулевого управления позволяет пилоту выполнять поворот вокруг вертикальной оси между рулевой и передней рамами (рис. 6).

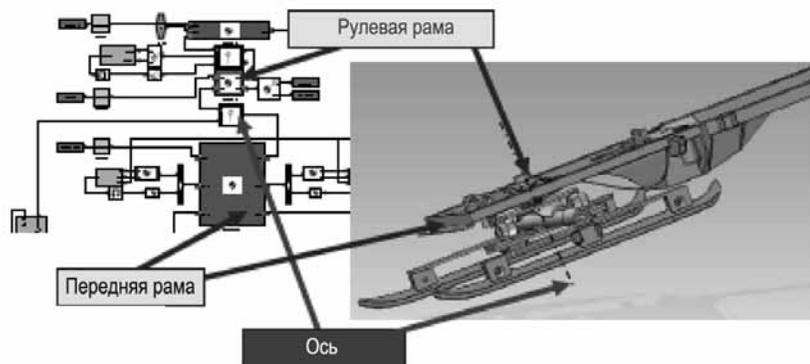


Рисунок 6. Схема передней рамы, рулевой рамы и оси поворота, а также соответствующие блоки в схеме, выполненной в программе SimMechanics

Рулевая рама была введена в модель в виде твердого тела, соединенного с передней рамой посредством идеального плоского стержня.

Рулевая рама несет на себе поперечину, прикрепляемую к ней с помощью другого стержня (называемого вторичным или вспомогательным стержнем).

Таким образом, передняя поперечина обеспечивает движение «качения» относительно рулевой рамы.

Передняя поперечина (рис. 7) включена в схему в качестве твердого тела с одной степенью свободы (углом крена) относительно рулевой рамы; идеальный стержень использован для описания соединения, и нелинейная жесткость на кручение добавлена в целях воспроизведения реакции нелинейной пружины, установленной на бобслейных санях. Задняя поперечина жестко крепится к задней раме.

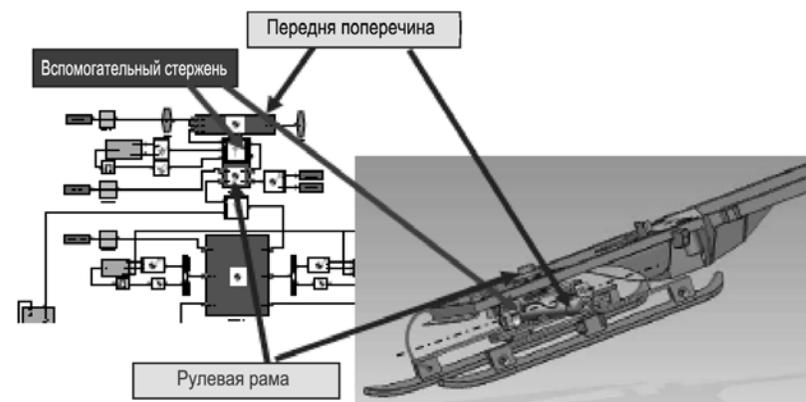


Рисунок 7. Схема рулевой рамы, передней поперечины и вспомогательного стержня, а также соответствующие блоки в схеме, выполненной в программе SimMechanics

На рисунке 8 показана схема соединения между передней поперечиной и левым передним полозом. Полозья крепятся к передней и задней поперечинам посредством двух листовых рессор и резинового элемента, смонтированных между поперечиной и центральной частью полоза.

Таким образом, осуществляется эластичное подвешивание главной рамы с помощью пружин; резиновое уплотнение обеспечивает амортизацию системы.

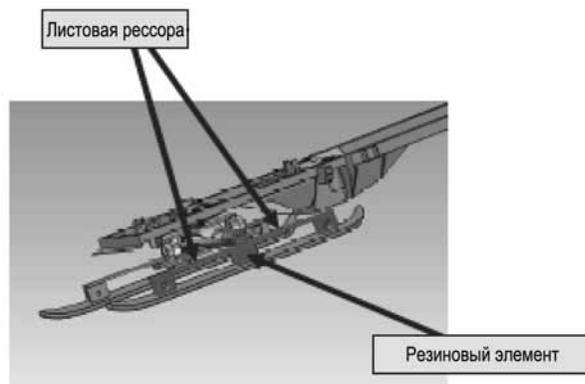


Рисунок 8. Схема соединения между передней поперечиной и передним левым полозом

### Модель контакта с опорой

После того как были созданы модели боба и трассы, была разработана модель, определяющая взаимодействие между санями и ледяной поверхностью желоба [5].

Контакт боба с трассой осуществляется посредством 4 полозьев, кроме того могут наблюдаться ударные взаимодействия со стенками трассы, связанные со снижением скорости, в которых непосредственно участвуют 4 боковых буфера, расположенных по углам главной рамы саней.

Модели взаимодействия предполагают присутствие одной единственной точки контакта в заданном положении, как для полозьев, так и для буферов, т.е. они не учитывают распределения контактного давления и напряжения сдвига над контактной поверхностью. Данный подход может оказаться весьма приближенным. Особенно, это касается контакта с полозьями, когда одна или более точек контакта могут перемещаться в продольном направлении вдоль полоза.

Однако отсутствие экспериментальных данных и ограниченное количество литературных источников по данной теме обуславливает необходимость применения этого упрощенного подхода, по крайней мере, на данной стадии исследования.

Вначале рассматривается контактная модель, разработанная для определения взаимодействия между полозьями и льдом, а затем моделирование контакта между бамперами и стенками желоба.

Как показано на рисунке 9, на котором изображен передний левый полоз, точка контакта  $P_c$  условно располагается в центре полоза прямо под резиновым элементом.

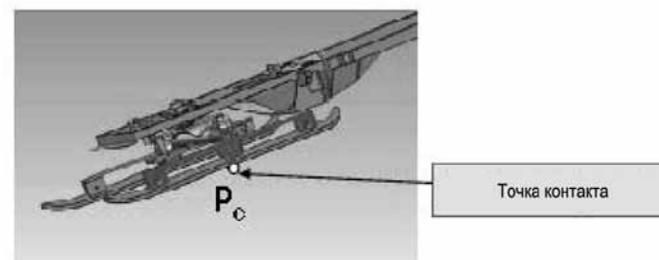


Рисунок 9. Положение точки контакта на левом переднем полозе

Поскольку трасса в данной модели представляет собой набор дискретных точек, первый этап заключается в определении способа аналитического представления, используемого для описания контактной поверхности.

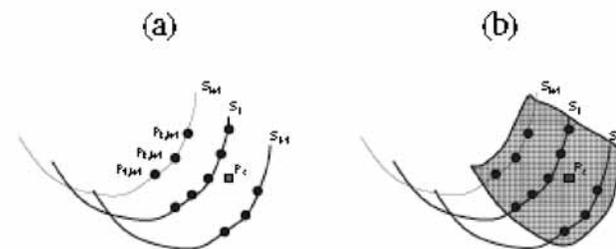


Рисунок 10. Идентификация 11 точек: (а) ближайших к точке контакта  $P_c$ ; (б) локальное аналитическое приближение для контактной поверхности

На рисунке 10а показаны три участка (Si-1, Si, Si+1), ближайших к точке контакта Pc; 11 точек, принадлежащих к данным участкам, были приняты за локальное приближение для контактной поверхности, как можно видеть на рисунке 10б.

Данные 11 точек, ближайших к точке контакта Pc, определяются и выражаются в локальной системе координат с центром в Pc и фиксируются на полозе: это делает возможным аналитическое представление контактной поверхности даже, если угол крена боба превышает 90°.

### **Модель пилота**

Пилот, сидение которого находится на задней раме, управляет санями с помощью двух ручек управления. При различии сил, прилагаемых к данным двум рукояткам, происходит вращение соединенных с ними рычагов, что вызывает вращение оси поворота, на которой закреплены передние полозья.

Оценивая стиль управления бобом, применяемый разными пилотами мирового уровня при прохождении одной и той же бобслейной трассы, было выявлено, что некоторые пилоты имеют «плавную» манеру вождения, что позволяет им показывать хорошую результативность на протяжении первой половины трассы при низкой скорости спуска.

Другие рулевые, напротив, придерживаются «импульсивного» стиля управления: перед прохождением виража они резко манипулируют ручками управления в целях как можно более быстрого вхождения в вираж, а затем регулируют траекторию движения посредством мелких поправок.

С точки зрения результативности этот стиль является более эффективным при высоких скоростях, то есть во время второй половины трассы.

И, наконец, есть такие пилоты, которые приспособливают применяемый ими стиль управления к скорости саней, переходя по мере необходимости от плавной к импульсивной манере вождения. *Именно эти (очень немногие) пилоты достигают наивысшей результативности.* Очевидно, что траектория движения боба изменяется в зависимости от стиля управления.

Следует отметить, что поскольку двигателем для передвижения бобслейных саней служит гравитационное ускорение, и коэффициент трения обычно снижается с увеличением скорости скольжения, более важно осуществлять эффективное преобразование потенциальной энергии в кинетическую (то есть применять наиболее эффективный стиль вождения) в начале трассы, чем в ее конце.

При разработке настоящей модели пилота была сделана попытка воспроизвести стиль вождения лучших пилотов при идентификации «идеальной» траектории, то есть траектории, требующей минимального рулевого управления (и тем самым минимального взаимодействия между полозьями и ледовой поверхностью), и отличающейся максимальной простотой, то есть следующей алгоритму, в основе которого лежит пропорциональность «визуальной» длины трассы скорости движения саней.

*При этом необходимо учитывать, что вышеупомянутая «идеальная» траектория обычно не является самой короткой траекторией.*

Таким образом, следующий этап разработки модели пилота будет заключаться в определении оптимальной траектории на основе достижения наиболее разумного компромисса между идеальной и кратчайшей траекториями.

Цифровая модель пилота была разработана в программе Simulink при использовании модели саней, созданной с применением программы SimMechanics, и оказывает воздействие на степень свободы оси поворота посредством установки определенного угла поворота.

*Идеальная траектория* определяется как траектория, обеспечивающая минимизацию бокового проскальзывания и вместе с тем рулевого управления, которое является одной из главных причин рассеивания кинетической энергии. Ее получают путем сведения к нулю недостатка наклона, т.е. уравнивания центробежной силы, проецируемой на касательную плоскость контакта, с массой тела, проецируемой на ту же самую плоскость, как показано на рисунке 11.

$$\min \left[ m \frac{v^2}{R} \cos \alpha - mg \sin \alpha \right] \quad (5)$$

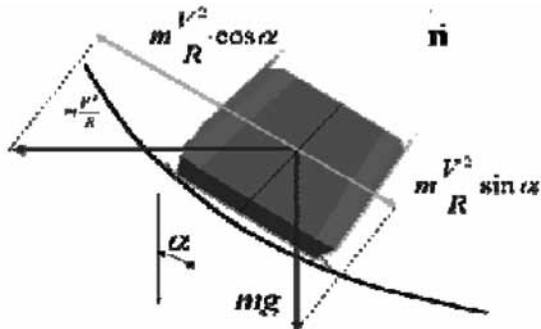


Рисунок 11. Динамическое равновесие боба

Этот способ определения идеальной траектории может применяться только для криволинейных участков трассы.

Для прямолинейных участков берется траектория, требующая минимального рулевого управления, рассчитываемая с помощью уравнения 6.

$$\delta = k_s \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Где  $k_s$  – коэффициент усиления пропорциональности, который отражает быстроту реакции пилота, и  $\varepsilon$  – ошибка траектории, т.е. расстояние между пунктом  $P_1$ , который боб достигнет через заданный интервал времени без изменения положения руля, и пунктом  $P_{пф}$  на идеальной траектории того же самого участка трассы (рис. 12).

При этом заданный интервал времени  $t_0$ , используемый для определения ошибки траектории, преобразуется в «визуальное расстояние»  $l_0$

$$(l_0 = t_0 \cdot v \quad (7)),$$

которое является функцией скорости в бобслее.

В то время как при низких скоростях для того чтобы иметь плавную манеру вождения достаточно короткого визуального расстояния, при высоких скоростях требуются более длинные визуальные расстояния для удержания саней на трассе. Следует отметить, что данное визуальное расстояние не имеет ничего общего с реальным участком трассы, ко-

торый пилот может видеть перед собой во время бобслейного спуска. На самом деле понятие визуального расстояния отражает способность пилота помнить трассу.

Поскольку сидение реального пилота находится на задней раме, исходными данными для создания модели пилота служат положение выступа, изображающего пилота (который фиксируется на задней раме), и матрица поворота задней рамы.

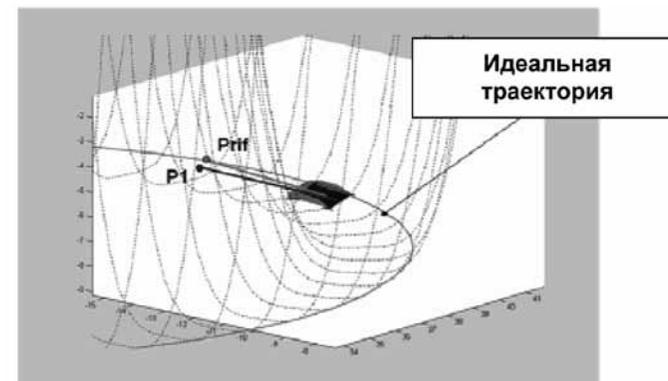


Рисунок 12. Графическое представление расчета ошибки траектории

Зная положение выступа пилота, матрицу поворота задней рамы и визуальное расстояние  $l_0$ , а также координату точки  $P_1$ , можно легко определить угол поворота руля:

$$\delta = k_s \cdot \varepsilon = k_s \frac{(x_{P_{пф}} - x_{P_1})}{\|x_{пф}\|} = k_s f(l_0) \quad (8)$$

Следует отметить, что как  $x_{P_{пф}}$ , так и  $x_{P_1}$  берутся в криволинейной системе координат вдоль трассы и что ошибку положения  $\varepsilon$  и вместе с ней угол поворота можно рассчитать для любого момента времени.

### Сравнение двух трасс

В настоящем исследовании выполнялось сопоставление двух санно-бобслейных трасс, на которых проводились зимние олимпийские игры 2006 года (Чезана Париоль, Италия) и зимние олимпийские

игры 2010 года (Уистлер, Канада). Обе трассы проектировались одной и той же фирмой.

На рисунках 13 и 14 показаны планы этих двух трасс с указанием перепада высот как функции криволинейных координат, а в таблице 1 обобщены наиболее важные характеристики обеих трасс.

При этом можно ясно видеть, что трасса в Уистлере является более тяжелой, поскольку, *во-первых*, имеет более высокий средний уклон (благодаря более высокому перепаду высот) и, *во-вторых*, обеспечивает прохождение более короткой дистанции и тем самым более высокие скорости саней.

Таблица 1. Сравнение трасс в Чезана Париоль и Уистлере

	Средний уклон (%)	Максимальный уклон (%)	Перепад высот (м)	Минимальный радиус кривой (м)
Чезана	9,1	18,3	124,5	12
Уистлер	11,6	20,4	149,3	12

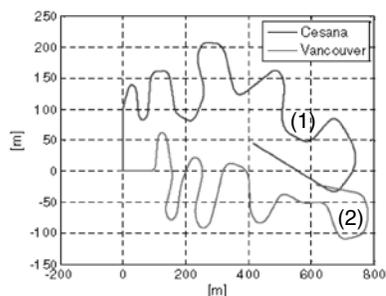


Рисунок 13. План трасс в Чезана Париоль (1) и Уистлере (2)

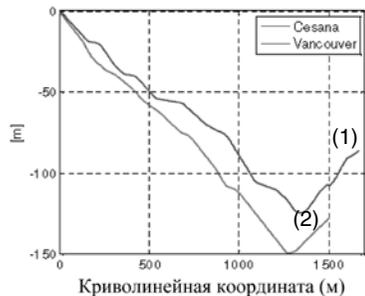


Рисунок 14. Перепад высот как функция криволинейных координат на трассах в Чезана Париоль (1) и Уистлере (2)

В то время как для трассы в Чезана Париоль изображения профилей участков имелись для каждых 0,5 м трассы, для трассы в Уистлере они были получены для каждых 2 м. Поэтому потребовалось выполнение этапа прореживания изображений в целях получения большего количества «виртуальных» участков.

На рисунках 15 и 16 показаны данные по моделированию скорости саней и рулевого управления на обеих трассах. Как и предполагалось, трасса в Уистлере отличается более высокими скоростями и потому требует более интенсивного рулевого управления.

Кроме того, в то время как трасса в Чезана Париоль содержит участки, на которых скорость сохраняется на постоянном уровне или даже снижается, трасса в Уистлере характеризуется почти постоянным повышением скорости на всем ее протяжении, которая может достигать почти 150 км/ч.

Если проанализировать центробежную силу на трассах (рис. 17 и 18), то можно увидеть, что трасса в Уистлере характеризуется максимальным нормальным ускорением, равным почти 5,5 g (на 14 вираже, получившем название «испытание для одержимых золотой лихорадкой»), которое превышает разрешенный правилами максимальный показатель и достигается на входе в вираж.

При применении традиционного метода, определения радиуса кривизны виража с помощью уравнения 1 данный показатель был бы равен 4,4 g (соответствует нормальному ускорению, моделируемому для среднего виража), при этом его занижение составило бы почти 20%.

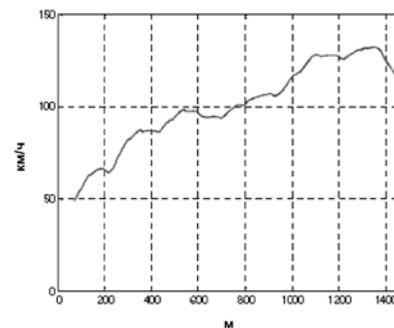


Рисунок 15. Моделирование скорости боба на трассах в Чезана Париоль и Уистлере

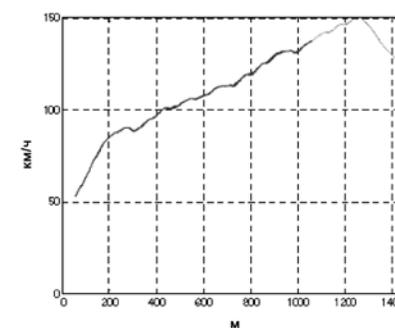


Рисунок 16. Моделирование рулевого управления на трассах в Чезана Париоль и Уистлере

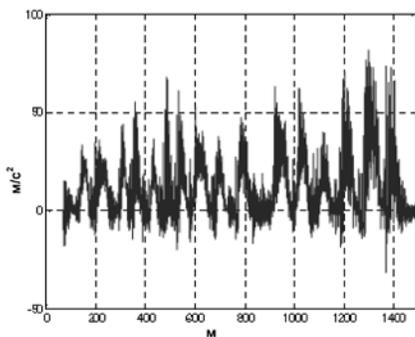


Рисунок 17. Моделирование нормального ускорения на трассе в Чезана Париоль

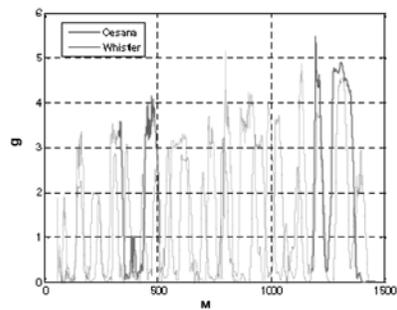


Рисунок 18. Моделирование нормального ускорения на трассе в Уистлере (отфильтровано на фильтре нижних частот при предельной частоте 10 Гц)

## Выводы

Полученные результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании новых санно-бобслейных трасс и/или объективной оценки уже существующих.

При их использовании на стадии проектирования становится возможным вносить технические дополнения, не нарушая ограничений, установленных действующими правилами.

1. *International Rules – Bobsleigh*. Version 1.0 October 2008, <http://www.fibt.com/fileadmin/Rules/>
2. P. Dabnichki, A. Baca. *Computers in Sport*. WITPress Southampton, Boston, 2008.
3. F. Braghin, F. Cheli, M. Donzelli, S. Melzi, E. Sabbioni. *Multibody model of a bobsleigh*. Proceedings of IAVSD 2008, Budapest, Hungary.
4. F. Braghin, F. Cheli, M. Donzelli, S. Melzi, E. Sabbioni. Bobsleigh performance optimization through a multibody model. Proceedings of Multibody Dynamics 2009, Warsaw, Poland.
5. G. Kielau, P. Maisser. *Nonholonomic Multibody Dynamics*. Multibody System Dynamics, 9, 213-188, 2003.

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БОБСЛЕЕ:  
ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ВЫПУСК 2**

Подписано в печать 25.10.2012. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Гарнитура NewtonС. Печать офсетная.  
Усл.п.л. 13. Тираж 200. Заказ

ООО «ТВТ Дивизион»  
e-mail: sportbooks@mail.ru

Отпечатано в ООО «Типография «САРМА».  
г. Подольск, ул. Правды, д.30