

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



А.Ю. Григорьев, Ю.С. Молчанов

**ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТРЕНИЯ ПРИ СТРАГИВАНИИ
И СКОЛЬЖЕНИИ ТЕЛ**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 531(075)

Григорьев А.Ю., Молчанов Ю.С. Теория механизмов и машин. Экспериментальные исследования трения при страгивании и скольжении тел: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 32 с.

Дано описание экспериментальной установки и методики исследования трения и коэффициентов сцепления при страгивании и скольжении тел, а также пример исследования трения в конкретной кинематической паре с оценкой доверительного интервала величин полученных результатов.

Предназначено для бакалавров направлений 140700 Ядерная энергетика и теплофизика, 141200 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, 151000 Технологические машины и оборудование, 190600 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 220700 Автоматизация технологических процессов и производств очной и заочной форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Арет

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014

© Григорьев А.Ю., Молчанов Ю.С., 2014

ВВЕДЕНИЕ

Способность контактирующих поверхностей кинематических пар механизмов сопротивляться их относительному перемещению называется трением. Оно обусловлено неровностями контактирующих поверхностей и силами молекулярного сцепления материалов [1], из которых данные поверхности сделаны.

Трение характеризуется силами трения (при поступательных движениях) и моментами сил трения (при вращательных движениях, либо качении тел по шероховатым поверхностям).

Сила трения направлена по касательной к контактирующим поверхностям в сторону противоположную вектору скорости их относительного перемещения.

Трение играет положительную роль во многих видах механических движений. В частности, при движении людей и животных создаётся за счёт трения упор, позволяющий им перемещаться, благодаря трению возможно движение и торможение транспортных средств, передача мощности во фрикционных и ремённых механизмах, обработка различных поверхностей и реализация многих других процессов.

С другой стороны, преобразование в машинах кинематической энергии в тепловую, за счёт трения, снижает их полезное действие и ведёт к непроизводительным потерям.

Считается [2], что до 1/3 мировых энергетических ресурсов расходуется на преодоление трения.

Ввиду важности проблемы, к настоящему времени сформировалась научно-техническая дисциплина – трибология [7]. В её основу положены работы французских учёных Кулона, Амонтона, а также русского учёного И.И. Артоболевского [3] и других.

Различают следующие виды трения [4]:

1. Трение покоя – появляется в момент, когда два тела, находящиеся в состоянии относительного покоя, находятся в преддверии начала относительного движения. Это трение, в

основном, определяется силами молекулярного сцепления материала тел, максимальная их величина равна силе трения покоя.

2. Трение скольжения – появляется при наличии относительного движения поверхностей, для большинства материалов сила трения скольжения меньше силы трения покоя.
3. Трение качения – появляется в высших кинематических парах при наличии относительного вращательного движения поверхностей.
4. Трение верчения – возникает при взаимодействии торцевых поверхностей в подпятниках, а также в упорных подшипниках.

На величину силы трения оказывают большое влияние различного вида смазки. Поэтому различают следующие виды трения:

1. Сухое трение, при котором между соприкасающимися поверхностями нет смазки, оно обусловлено деформацией выступов шероховатых поверхностей и молекулярным сцеплением материалов. Сравнение шероховатости поверхностей определяется по ГОСТу 9376-93, параметры шероховатости поверхностей определяется по ГОСТу 2789-73.
2. Жидкостное трение, при котором трущиеся поверхности полностью разделены слоем смазки, сопротивление движению определяется сдвигом слоёв смазки (внутреннее вязкостное трение).

Возможны и промежуточные виды трения – полусухое или полужидкостное, в зависимости от того, какой вид трения преобладает, а также граничное трение, при котором слой смазки очень тонкий, порядка 0,1мм.

1. Цель экспериментального исследования

В технических расчётах сила трения вычисляется в виде доли нормальной составляющей реакции давлению трущихся поверхностей. Такой подход позволяет не увеличивать числа неизвестных сил в динамических уравнениях движения кинематических пар. Тогда сила трения:

$$F = f \times N, \tag{1}$$

где N – нормальная составляющая реакции трущихся поверхностей;
 f – коэффициент трения.

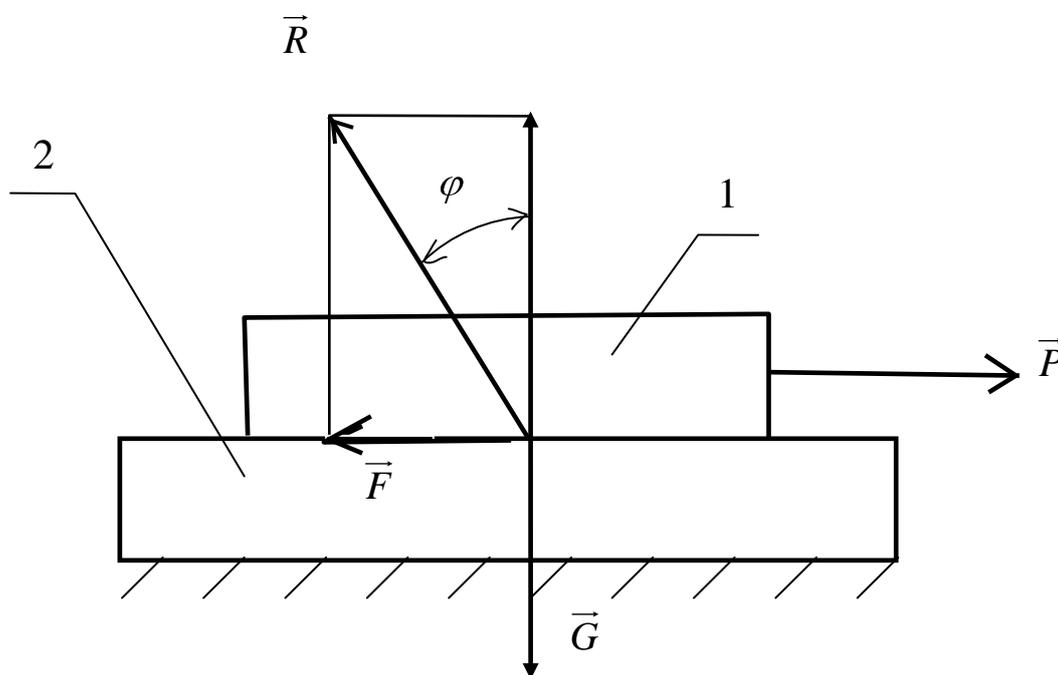


Рис. 1.

Ввиду многообразия факторов, определяющих силу трения, коэффициент трения f определяется экспериментально.

На рис. 1 показаны соприкасающиеся поверхности двух звеньев 1 и 2, находящихся в покое. Пусть со стороны звена 1 на звено 2 действует сила G , тогда на звено 1, со стороны звена 2 действует реакция силы \vec{N} . Если к звену 1 приложить силу \vec{P} , то его движению будет препятствовать сила сцепления \vec{F} , в результате полная реакция опоры 2 будет равна геометрической сумме:

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}. \quad (2)$$

Угол φ между векторами \vec{R} и \vec{N} называется углом трения. При других направлениях силы \vec{P} (в горизонтальной плоскости) вектор \vec{R} образует коническую поверхность, которая называется конусом трения.

При достижении некоторого значения силы \vec{P} звено 1 приходит в движение. Максимальная сила страгивания в момент страгивания (начала движения) звена 1 определяется соотношением:

$$[\vec{F}]_{\max} = f_0 \times [\vec{N}], \quad (3)$$

где f_0 - коэффициент сцепления.

Соответствующий угол трения

$$\varphi_0 = \arctg f_0. \quad (4)$$

Угол трения φ_0 и соответствующий конус трения, играют важную роль в расчётах механизмов. Дело в том, что если страгивающая сила по направлению попадает во внутреннюю часть конуса трения, то она не может сдвинуть звено 1 относительно звена 2. Аналогичные явления возможны и в кинематических парах других видов, это называется заклиниванием механизма, при нём

кинематическая пара теряет подвижность, а механизм – не выполняет своего назначения. На величины коэффициентов f_0 и f оказывают влияние многие факторы, в частности, материалы трущихся тел, состояние их поверхностей, скорость относительного движения, различные виды смазки. В большинстве случаев коэффициент f_0 (сцепления) больше коэффициента f (скольжения), с применением смазки оба коэффициента значительно уменьшаются.

Многообразие факторов делает экспериментальное определение коэффициентов f_0 и f представляющим не только учебный, но и научный интерес.

Целью исследования является экспериментальное определение коэффициента сцепления и коэффициента трения скольжения для различных материалов трущихся тел при сухом трении. Эти значения позволяют установить максимальное значение этих коэффициентов для условий эксперимента.

2. Методика измерения силы трения скольжения

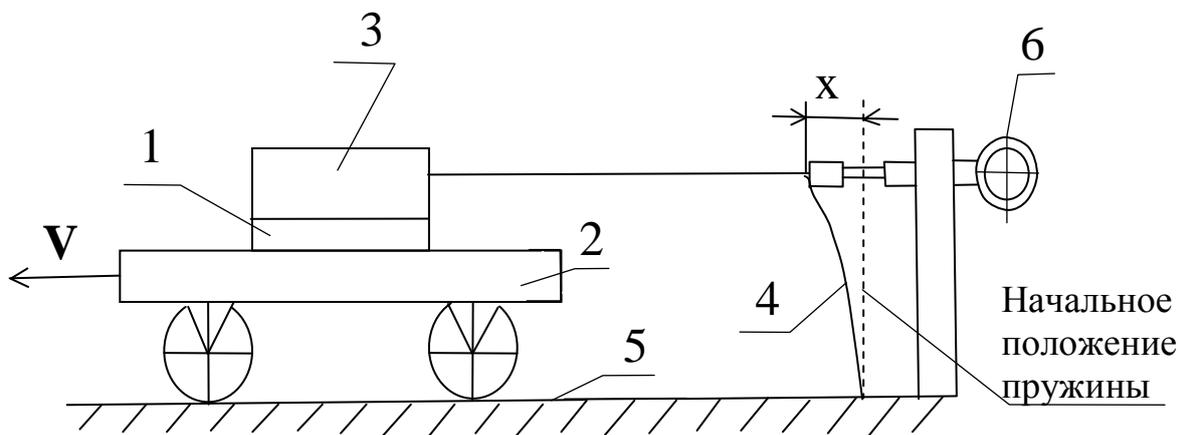


Рис. 2.

Пусть требуется измерить силу трения, возникающую при скольжении образца 1 по плите 2 (рис. 2). Сила давления образца 1 на плиту 2 задаётся с помощью груза 3, установленного на образце. Для измерения силы трения скольжения образец 1 соединён со свободным концом плоской пружины 4, установленной на основании 5. Если сообщить плите 2 движение влево с некоторой заданной скоростью V , то в начальный период времени образец 1 будет перемещаться вместе с плитой за счёт сил сцепления между ними. При этом нить натягивается, а плоская пружина изгибается. Через некоторое время пружина останавливает образец 1, а плита 2 продолжит движение. Сила трения будет равна силе упругости плоской пружины:

$$F = c \cdot x. \quad (5)$$

Измерив, с помощью индикатора 6 отклонение x конца плоской пружины от начального положения и зная жёсткость пружины « c », можно определить силу трения скольжения F по формуле (5).

3. Метод измерения максимальной величины силы сцепления (трения покоя)

Измерение максимальной силы сцепления осуществляется с помощью того же устройства, что и определение силы трения при скольжении тел. Оно выполняется в момент времени, непосредственно предшествующий началу относительного движения плиты 2 и образца 1 в этом опыте, между нитью и концом плоской пружины дополнительно устанавливается промежуточная пружина малой жёсткости. В начале движения плиты 2 образец 1 начинает перемещаться вместе с ней вправо, при этом происходит удлинение промежуточной пружины и изгиб плоской пружины. Благодаря малой жёсткости промежуточной пружины происходит замедление

нарастания силы упругости плоской пружины, что облегчает наблюдение за движением стрелки индикатора при относительном сдвиге опытного образца. Общая деформация плоской пружины при введении дополнительной пружины мало изменяется, просто увеличивается общая деформация двух последовательно поставленных пружин. Для испытываемых материалов максимальная сила сцепления больше силы трения скольжения, поэтому достаточно зафиксировать максимальное отклонение конца плоской пружины по показаниям индикатора.

Для практического измерения сил сцепления и трения между образцами предварительно выполняется тарировка измерительного устройства перед исследованием с помощью блока и сменных грузов. Её результатом служит зависимость:

$$F_0 = f_1(n), \tag{6}$$

$$F = f_2(n),$$

где n – число делений индикатора; F_0 , F – соответственно силы сцепления и трения (Н).

4. Экспериментальная установка

Исследование выполняется на приборе ТМП 32-А, предназначенном для определения коэффициентов трения между плоскими образцами при равномерном их относительном движении.

Основные характеристики прибора:

1. Относительная скорость движения образцов 0,027 м/с;
2. Жёсткость плоской пружины $C = 6,37$ н/мм;
3. Вес груза 1,0 г, 1,5 г, 4,6 г Н ($g = 9,81$ м/с²);

4. Набор испытываемых материалов и шероховатость их поверхностей по ГОСТу 2789-73.

Вид образца	материал	Ra , мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм	Примечания
Образец 1		0,91	4,55	4,93	Форма – круглая Ø 150мм
Образец 2		0,41	3,62	5,38	Форма – круглая Ø 150мм
Образец 3		0,19	1,13	1,57	Форма – круглая Ø 150мм
Плита 1		0,04	0,28	0,53	Форма - прямоугольная 700x250 мм.
Плита 2		0,15	0,72	1,50	Форма - прямоугольная 700x250 мм.
Плита 3		0,02	0,13	0,19	Форма - прямоугольная 700x250 мм.

Прибор содержит (рис. 3): 1–основание; 2–тележка; 3-сменная плита; 4–груз; 5–тяга; 6–плоская пружина; 7–индикатор; 8–сменный образец; 9–электропривод; 10–переключатель; 11–откидной ограничитель.

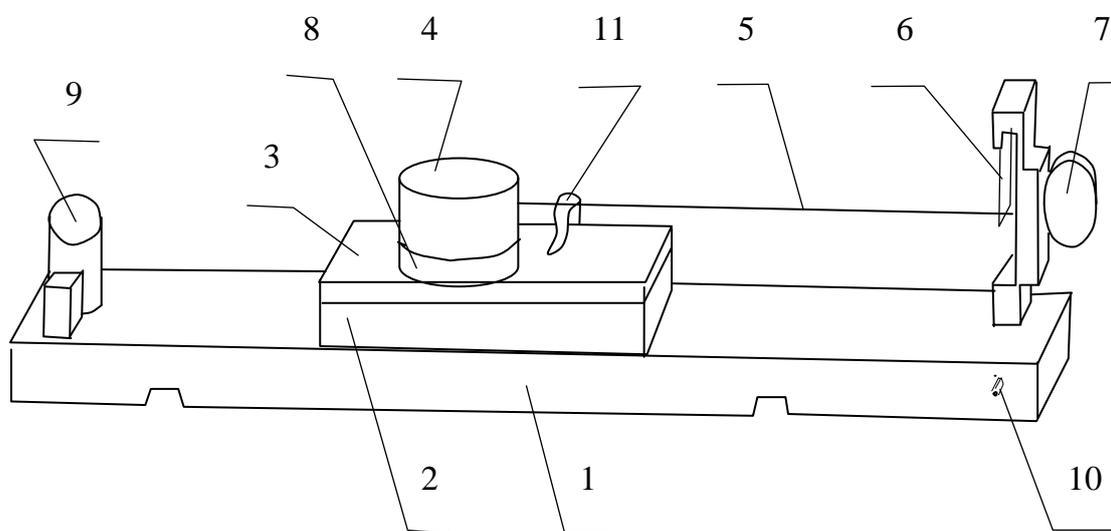


Рис. 3.

Тележка 2, установленная на основании 1, перемещается возвратно-поступательно при помощи механизма электропривода 9. в качестве приводного двигателя применён асинхронный электродвигатель, который задаёт постоянную скорость перемещения тележки.

Ход тележки ограничивается с двух сторон концевыми выключателями. На площадку тележки устанавливаются съёмные плиты, выполненные из различных материалов. На плиту 3 устанавливается съёмный образец 8, который прижимается грузом 4. Груз соединяется с пружиной 6 измерительного устройства через тягу 5 с дополнительной пружиной, или только через тягу 5. Плоская пружина 6 закреплена в стойке, в которой устанавливается индикатор 7. Шток индикатора соприкасается со свободным концом пружины 6. Запуск движения тележки и изменение направления её движения осуществляется переключателем 10.

При перемещении тележки от пружины 6 груз, прижимающий образец к плите, стремится сдвинуться вместе с тележкой и создаёт

усилие, которое через тягу передаётся на плоскую пружину измерительного устройства. Пружина деформируется и развивает усилие, которое удерживает груз вместе с образцом на месте, при этом образец начинает скользить по плите. Перемещение конца плоской пружины пропорционально силе трения. Величина перемещения измеряется индикатором.

5. Порядок исследования

5.1. Тарировка измерительного устройства.

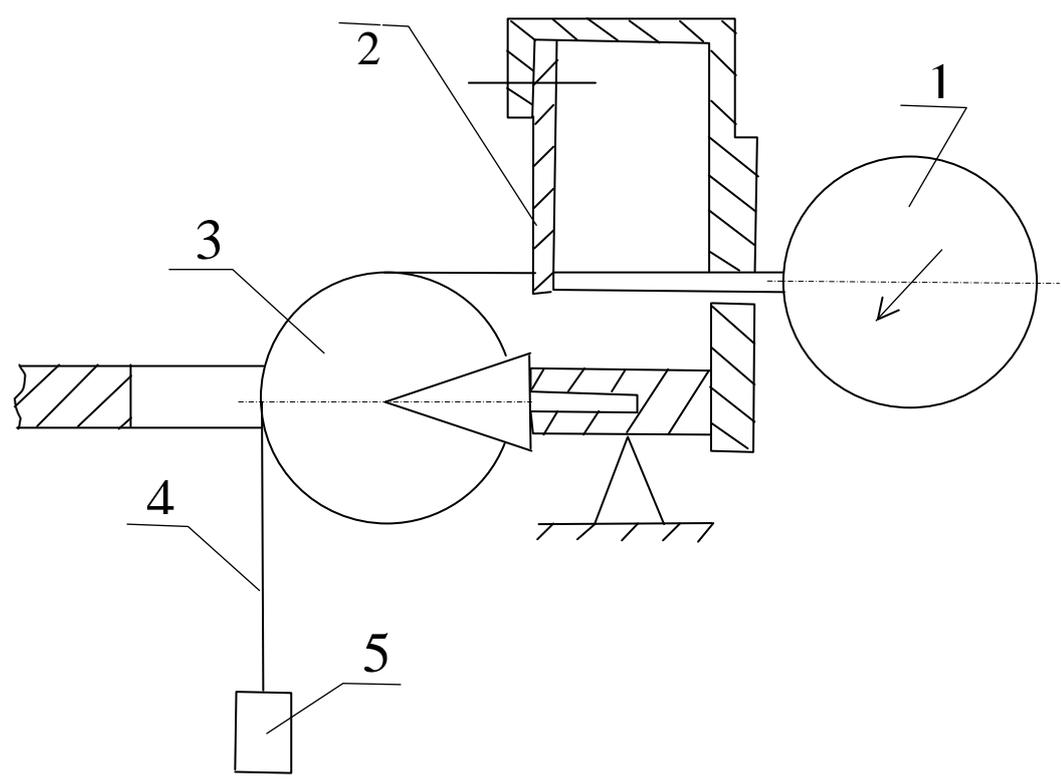


Рис. 4.

В комплект прибора входит блок с упором, позволяющим установить его за плоской пружиной. В основании имеется вырез, позволяющий установить нить, перекинутую через блок, в вертикальное положение. Схема устройства для тарировки показана на рисунке 4. Она включает индикатор 1, пружину 2, съёмный блок 3, тягу 4, сменный груз 5.

После сборки устройства, стрелка индикатора устанавливается в нулевое положение при отсутствии сменного груза 5 и слегка стронутым блоке 3, это делается для того, чтобы исключить из показаний индикатора вес свешивающейся части тяги и силу трения покоя в опорах блока 3.

С помощью сменных грузов получается тарировочная зависимость:

$$F = f(n), \quad (7),$$

где n – число делений на шкале индикатора;

F – сила, деформирующая пружину (Н).

5.2. Измерение коэффициента сцепления (трения покоя).

5.2.1. Включение прибора в электрическую сеть.

5.2.2. Переключение тумблера на основании прибора в правое положение, при этом тележка перемещается в крайнее положение. Остановка её происходит автоматически.

5.2.3. Установка на тележку плиты из исследуемого материала.

5.2.4. Соединение образца для испытаний с грузом.

5.2.5. Установка образца с грузом таким образом, чтобы он оказался слева от откидного ограничителя.

5.2.6. Установка стрелки индикатора на нулевую отметку.

5.2.7. Присоединение дополнительной пружины малой жёсткости к плоской пружине и тяге, ведущей к грузу.

5.2.8. Переключение тумблера в левое положение, при этом тележка двинется влево и показания индикатора растут.

5.2.9. Отсчёт максимального показания индикатора, соответствующего страгиванию исследуемого образца относительно плиты.

5.2.10. Измерения показаний индикатора выполняется десять раз.

По тарировочной кривой (7) определяется:

$$F_{0\max} = f(\vec{n}), \text{ Н.} \quad (8)$$

Далее вычисляется коэффициент трения покоя:

$$f_0 = F_0^{\max}/G, \quad (9)$$

где, G – суммарный вес груза и образца, Н.

5.3 Измерение коэффициента трения скольжения состоит из следующих операций:

5.3.1. Установка тележки в крайнее правое положение с помощью тумблера.

5.3.2. Удаление дополнительной пружины и соединение тяги непоследовательно с плоской пружиной.

5.3.3. Приведение в движение тележки и запись показаний индикатора при равномерном её движении.

5.3.4. Записи показаний индикатора выполняются десять раз.

5.3.5. По тарировочной кривой определяется сила и коэффициент трения:

$$F = f(n), f = F/G. \quad (10)$$

Результаты вычислений заносятся в таблицу протокола исследований.

6. Оценка погрешности эксперимента

Оценка погрешности эксперимента выполняется сначала для обоих коэффициентов f_0 и f .

6.1. Вычисляется среднее значение опытных данных:

$$\bar{f}_0 = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n f_{K0}; \quad \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n f_K, \quad (11)$$

где n – число измерений.

6.2. Статическая оценка дисперсии результатов:

$$D(f_0) = \sum_{K=1}^n \frac{(f_{KK} - \bar{f}_0)^2}{n}; \quad D(f) = \sum_{K=1}^n \frac{(f_K - \bar{f})^2}{n}. \quad (12)$$

6.3. Смещённая оценка дисперсии результатов:

$$S_0^2 = \frac{n}{n-1} D(f_0); \quad S^2 = \frac{n}{n-1} D(f). \quad (13)$$

6.4. Среднеквадратичное отклонение результатов исследования:

$$\sigma(f_0) = \sqrt{S_0^2}; \quad \sigma(f) = \sqrt{S^2}. \quad (14)$$

6.5. В предположении нормального закона распределения плотности вероятности случайных измерений, получается, что с вероятностью 0,95, доверительный интервал величин коэффициентов f_0 и f соответствует $\pm 1,72\sigma(f_0)$, $\pm 1,72\sigma(f)$ при $n = 10$ [6].

Исследование выполняется в виде лабораторных работ, проводимых студентами.

Образец формы титульного листа студенческого отчёта приведён в приложении 1.

Пример оформления результатов лабораторного исследования приведён в приложении 2.

7. Вопросы для обсуждения исследования коэффициентов трения на семинарских занятиях студентов

- 7.1. На какие виды классифицируется трение в кинематических парах механизмов?
- 7.2. Что является целью исследования в данной лабораторной работе?
- 7.3. Что называется силой сцепления трущихся поверхностей?
- 7.4. Когда сила сцепления достигает максимального значения?
- 7.5. Что называется силой трения скольжения?
- 7.6. Как направлена сила трения скольжения?
- 7.7. Что называется коэффициентом сцепления?
- 7.8. Что называется коэффициентом трения?
- 7.9. Что называется углом трения, конусом трения?
- 7.10. От каких факторов зависят коэффициенты трения и скольжения?
- 7.11. Какие параметры шероховатости поверхностей устанавливаются ГОСТ 2789-73?
- 7.12. Каков принцип измерения силы трения скольжения в рассматриваемом лабораторном исследовании?
- 7.13. С какой целью устанавливается дополнительная пружина при измерении максимальной силы сцепления исследуемых поверхностей?

Форма титульного листа отчёта.

**Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, техники и оптики
Институт Холода и Биотехнологий**

Кафедра механики и прочности

Теория механизмов и машин.

**Лабораторная работа № 7:
Экспериментальное исследование трения при срагивании
и скольжении тел**

Работу выполнил

Студент _____

Факультета _____

_____ группы _____

_____ дата

Работу проверил _____

2014г.

Приложение 2

Исследование трения при страгивании и скольжении тел

1. Цель исследования – экспериментальное определение коэффициентов сцепления (трения покоя) и трения скольжения для кинематической пары плоских образцов.

2. Характеристика кинематической пары.

2.1. Материалы – сталь.

2.2. Сухое трение стального круглого образца весом 0,4g, по стальной плите. Вес образца и груза 5,0g Н.

2.3. Шероховатость плоских поверхностей по ГОСТ 2789-73:

2.3.1. Стальной образец (круглый), среднеарифметическое отклонение профиля поверхности от средней линии профиля $R_a=0.91$ мкм, высота неровностей (по десяти точкам) $R_z=4.55$ мкм, максимальная высота неровностей $R_{max}=4.93$ мкм.

2.3.2. Стальная плита:

$R_a=0,02$ мкм (микрон),

$R_z=0,13$ мкм,

$R_{max}=0,19$ мкм.

Измерение шероховатости опытных образцов выполнено на измерительной системе немецкой фирмы Hommer Werke на приборе Hommer Tester T8000.

3. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1: 1–испытуемый образец; 2–подвижная

тележка со стальной плитой; 3–груз; 4-пружина; 5-основание; 6-индикатор.

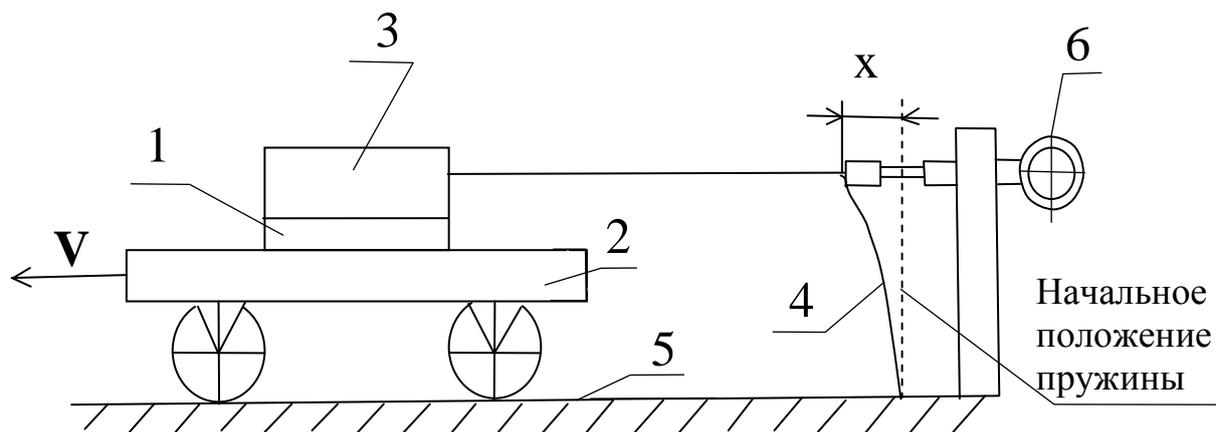


Рис. 1.

Технические характеристики прибора

3.1. Относительная скорость движения образцов испытываемых материалов 0,027 м/с.

3.2. Вес груза вместе с образцом 5·g Н.

3.2. Жёсткость измерительной пружины $c=6,37$ Н/мм.

3.4. Цена деления индикатора, устанавливается тарировкой, в виде зависимости $F = f(n) \cdot g$ Н/деление.

3.5. Дополнительная пружина: длина (свободное состояние) 50 мм.

4. Тарировка измерительного устройства.

Схема тарировочного устройства приведена на рисунке 2. На ней 1 – индикатор; 2 – плоская пружина; 3 – неподвижный блок; 4 – тяга; 5 – сменные грузы.

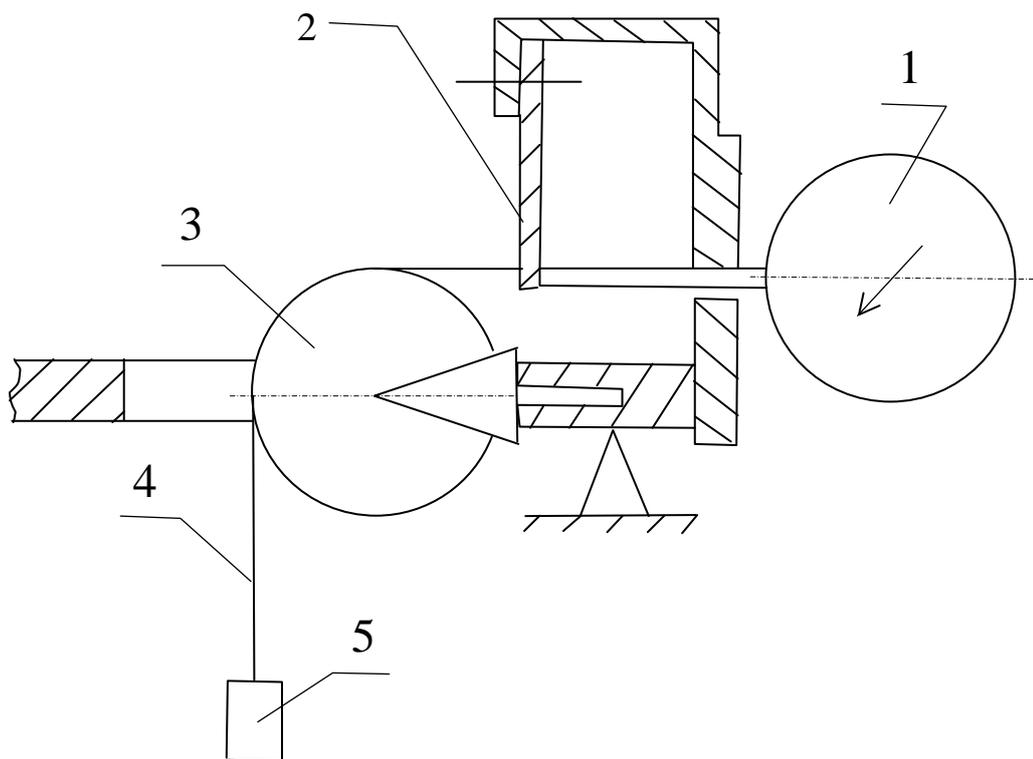


Рис. 2.

В результате тарировки составляется график $F = f(n) \cdot g$ (Н). На рисунке 3 приведены результаты тарировочных измерений при наличии дополнительной пружины и без неё.

Опыт показывает, что тарировочные кривые для схемы измерений с дополнительной пружиной и без неё имеют некоторые различия, поэтому тарировочные кривые построены отдельно для этих схем.

5. Измерение коэффициента трения скольжения.

Схема не содержит дополнительной пружины. Выполнено десять повторных измерений. Результаты измерений и обработка опытных данных приведены в таблице 1.

6. Измерение коэффициента сцепления (трения покоя).

Схема содержит дополнительную пружину, тарировка измерительного устройства выполнена отдельно. Результаты измерений и обработка результатов приведена в таблице 2.

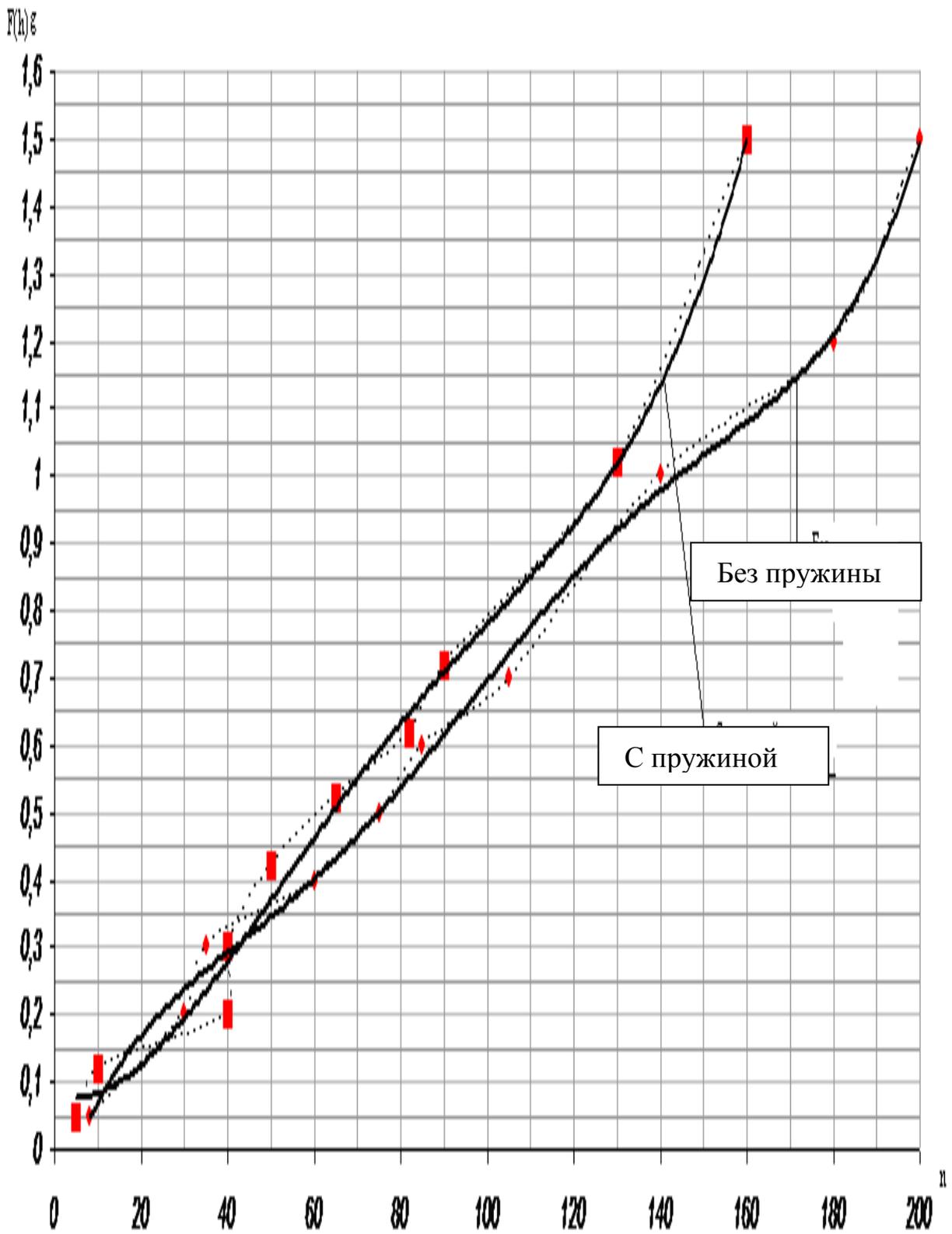


Рис. 3. n – делений индикатора

7. Выводы:

7.1. В результате, измерения коэффициента трения скольжения стального образца по стальной плите, получено значение $f=0,0932$.

Оценка доверительного интервала этого результата, в предположении нормального закона плотности вероятности погрешности, с вероятностью 0,95, дала результат $f = 0,0932 \pm 0,03$.

Скорость относительного перемещения образцов 0,027 м/с. Увеличение скорости перемещения, а также применение смазки уменьшает трение, поэтому полученный результат можно использовать как оценку верхнего значения коэффициента f для технически гладких поверхностей. Влияние шероховатости поверхностей на силу трения нуждается в дополнительных исследованиях.

7.2. Значение коэффициента f_0 , при страгивании поверхностей, соответствует значению $f_0 = 0,287$.

Оценка доверительного интервала этой величины, с вероятностью 0,95, в предположении нормального закона распределения плотности вероятности погрешности, даёт результат $f_0 = 0,287 \pm 0,03$.

Этот результат можно рассматривать как верхнее значение коэффициента f_0 , по аналогии с коэффициентом f .

Угол трения, соответствующий значению f_0 , составляет:

$$\varphi_0 = 0,28 \pm 0,027 \text{ рад, или } \varphi_0 = 16^0 \pm 1,6^0.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие. – М.: ЮРАЙТ, 2011. – 351 с.
2. Фролов К.В., Попов С.А. и др. Теория механизмов и машин. – М.: Высш. шк., 1987. – 496 с.
3. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
4. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 1. – М.: Машгиз, 1960. – 592 с.
5. Малеин В.Л., Романов А.В., Кулаев Д.Х. Теория механизмов и машин. Лабораторная работа № 7: Метод. указ. для студентов всех спец. – Л.: ЛТИХП, 1969. – 14 с.
6. Общий курс высшей математики для экономистов: Учеб. / Под ред. А.И. Ермакова. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 656 с.
7. Трибология. Международная энциклопедия. Т. 1–6; Под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: Анима, 2010–2013.

Таблица 1.

№ п/ п	Наименование величин	Обоз начен ие	Метод определ ения	Результаты измерений									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Число делений индикатора	n	измерен о	78	60	55	55	60	86	86	86	82	76
2	Сила трения	F (Н)	по тариров кривой	0,5 г	0,39 г	0,35 г	0,35 г	0,39 г	0,56 г	0,56 г	0,56 г	0,52 г	0,48 г
3	Сила тяжести груза и образца	G (Н)	измерен о	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g
4	Коэффициент трения скольжения	$f_k(-)$	F/G	0,1	0,07 81	0,07	0,07	0,07 8	0,11 2	0,11 2	0,11 2	0,10 4	0,09 6
5	Статическая оценка мат. ожидания f	$\vec{f}_k(-)$	$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f_k$ n=10	0,0932									
6	Квадратичное отклонение f_k	$\Delta_k^2(-)$	$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\vec{f} - f_k)$	0,4 61	2,28 3	5,38 7	5,38 7	2,31 3	3,53 1	3,53 1	3,53 1	1,16 4	0,07 8

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14, 15
7	Статическая оценка дисперсии	$D(f)(-)$	$(\bar{f} - f_k)^2 \cdot 10^4$	$2,767 \cdot 10^{-4}$									
8	Не смещённая оценка дисперсии	$S^2(f)(-)$	$\frac{n}{n-1} D(f)$	$3,074 \cdot 10^{-4}$									
9	Среднеквадратичное отклонение величины f	$\sigma(-)$	$\sqrt{S^2(f)}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$									
10	Доверительный интервал f с вероятностью $P=0.95$	$\pm \Delta f(-)$	$\pm 1,72\sigma$	0,03									
11	Значение коэффициента трения скольжения	$f(-)$	$f \pm \Delta f$	$0,0932 \pm 0,03$									

Таблица 2.

№ п/п	Наименование величин	Обозначение	Метод определения	Результаты измерений									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Число делений Индикатора	n	измерено	181,5	186,0	184,5	185,0	170,0	186,0	178,0	186,0	183,0	176,0
2	Сила трения (трения покоя)	F (Н)	по тарировочной кривой	1,45g	1,50g	1,47g	1,50g	1,25g	1,50g	1,35g	1,50g	1,47g	1,34g
3	Сила тяжести груза и образца	G (Н)	измерено	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g	5g
4	Коэффициент трения сцепления	$f_{0K}(-)$	F/G	0,290	0,300	0,294	0,300	0,250	0,300	0,270	0,300	0,294	0,268
5	Статическая оценка мат. ожидания f_0	$\bar{f}_0(-)$	$\frac{1}{n} \sum_{K=1}^n f_{0K} \quad n=10$	0,287									
6	Квадратичное отклонение f_{0K}	$\Delta_K^2(-)$	$(\bar{f}_0 - f_{0K})^2 \cdot 10^4$	0,09	1,69	0,49	1,69	13,69	1,69	2,89	1,69	0,49	3,61

Продолжение таблицы 2.

№ п/п	Наименование величин	Обозначение	Метод определения	Результаты измерений
7	Статическая оценка дисперсии	$D(f_0)(-)$	$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\overrightarrow{f_0} - f_{0k})^2$	$2,802 \cdot 10^{-4}$
8	Не смещённая оценка дисперсии	$S^2(f_0)(-)$	$\frac{n}{n-1} D(f)$	$3,110 \cdot 10^{-4}$
9	Среднеквадратичное отклонение величины f_0	$\sigma(-)$	$\sqrt{S^2}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$
10	Доверительный интервал f_0 с вероятностью $P=0.95$	$\pm \Delta f_0$	$\pm 1,72\sigma$	$3,03 \cdot 10^{-2}$
11	Значение коэффициента сцепления	f_0	$\overrightarrow{f_0} \pm \Delta f$	$0,28 \pm 0,027$
12	Угол трения	φ_0 рад, град	$arctgf_0$	$16^\circ \pm 1,6^\circ$

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Цель экспериментального исследования.....	5
3. Методика измерения силы трения скольжения.....	7
4. Метод измерения максимальной величины силы сцепления (трения и покоя).....	8
5. Экспериментальная установка.....	9
6. Порядок исследования.....	12
7. Оценка погрешности эксперимента.....	15
8. Вопросы для обсуждения исследования коэффициентов трения на семинарских занятиях студентов.....	17
9. Приложение 1: Форма титульного листа отчета.....	18
10. Приложение 2: Исследование трения при страгивании и скольжении тел.....	19
11. Выводы.....	23
12. Список литературы.....	24
13. Таблица № 1.....	25
14. Таблица № 2.....	27



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним их ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

В институте обучается более 6500 студентов и аспирантов. Коллектив преподавателей и сотрудников составляет около 900 человек, из них 82 доктора наук, профессора; реализуется более 40 образовательных программ.

Действуют 6 факультетов:

- холодильной техники;
- пищевой инженерии и автоматизации;
- пищевых технологий;
- криогенной техники и кондиционирования;
-

- экономики и экологического менеджмента;
- заочного обучения.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термотрансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение; машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

В институте создан информационно-технологический комплекс, включающий в себя технопарк, инжиниринговый центр, проектно-конструкторское бюро, центр компетенции «Холодильщик», научно-образовательную лабораторию инновационных технологий. На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются журнал «Вестник Международной академии холода» и электронные научные журналы «Холодильная техника и кондиционирование», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по 11 специальностям.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

Григорьев Александр Юрьевич
Молчанов Юрий Семёнович

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТРЕНИЯ ПРИ СТРАГИВАНИИ
И СКОЛЬЖЕНИИ ТЕЛ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Р.А. Сафарова

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Компьютерная верстка
Д.Е. Мышковский

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 22.07.2014. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1,86. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,81
Тираж 120 экз. Заказ № С 48

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

