

## ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ КЁНИГА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ



С.Н. Виноградов, студент,  
e-mail: sergey.vinogradov.04@mail.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

Н.П. Крукович, канд. техн. наук, доцент кафедры физики,  
e-mail: krukovichnina@mail.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В статье приводится один из методов проверки теоремы Кёнига о кинетической энергии экспериментальным путем с использованием лабораторного оборудования Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота. В ходе поиска подходящей установки выяснилось, что наиболее пригодной для проверки теоремы является маятник Максвелла. Данная работа носит прикладной характер и может лечь в основу формирования новой лабораторной работы для её последующего выполнения курсантами с целью изучения физики.

**Ключевые слова:** механика, вращательное движение, теорема Кёнига, механическая энергия, маятник Максвелла

### ВВЕДЕНИЕ

«Физика - это экспериментальная наука, в основе ее методологического здания лежит экспериментальное подтверждение теоретических построений» [1]. Поэтому особую роль при изучении физики в вузе имеет лабораторный практикум и его обновление.

«Сочетание теоретических и экспериментальных исследований в виде компьютерных и натурных лабораторных работ в лабораторном практикуме формирует представления о практической взаимосвязи физической теории и эксперимента в научных исследованиях» [2]. Лабораторный физический практикум современного технического вуза предполагает наличие широкого спектра лабораторных работ как в методическом плане, так и в плане их технического исполнения [3]. Научно-методическое обеспечение физического практикума отработывалось в течение длительного периода времени, изложено в ряде учебных и методических пособий и представляет собой достаточно стройную систему. В то же время его материально-аппаратурное обеспечение было практически полностью возложено на вузы [4]. Большое значение при изучении физики имеет модернизация лабораторного практикума и его интенсификация за счет увеличения инновационной составляющей лабораторных работ [5]. В настоящее время в связи с экономическими трудностями возникает необходимость наиболее полно использовать имеющуюся лабораторную базу для учебного процесса. С этой целью мы решили применить лабораторную установку «Маятник Максвелла» (рис.1) для более широкого изучения вопросов динамики вращательного движения.

Просмотрев соответствующую литературу, мы увидели, что маятник в основном используется для определения момента инерции тел и проверки закона сохранения энергии [6, 7, 8].

В настоящей работе предлагается применить лабораторную установку с маятником Максвелла не только для определения момента инерции, но и для проверки справедливости теоремы Кёнига опытным путем.

Как следствие, авторы рассматривают возможность включения материалов данной работы в лабораторный практикум для курсантов и студентов [9].



Рисунок 1 - Маятник Максвелла

### **ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом данного исследования является движение маятника Максвелла.

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Цель работы - проверка теоремы Кёнига экспериментальным путем при помощи маятника Максвелла с использованием закона сохранения механической энергии.

Для достижения данной цели исследования ставились следующие задачи: экспериментальным и теоретическим путем найти потенциальную и кинетическую энергию маятника Максвелла, на практике проверить справедливость теоремы Кёнига о кинетической энергии, решить задачу об определении ускорения падающего маятника Максвелла, разработать модель лабораторной работы, посвященной практическому доказательству теоремы Кёнига.

Значимость исследования заключается в возможности применения разработанной лабораторной работы в образовательном процессе при изучении физики в Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В процессе работы применялись экспериментальный и теоретический методы исследования, количественный и качественный анализ (наблюдение, сравнение, описание, эксперимент).

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Теорема, сформулированная и доказанная И. С. Кёнигом в 1751 г., звучит так: «Кинетическая энергия механической системы равна сумме кинетической энергии поступательного движения системы со скоростью движения центра масс и кинетической энергии вращательного движения той же системы в её вращении относительно системы центра масс».

Чтобы проверить данную теорему экспериментально, необходимо показать, что сумма кинетических энергий поступательного и вращательного движений маятника в нижнем положении равна его потенциальной энергии в верхнем положении, что следует из закона сохранения механической энергии. Для этого нам необходимо было провести измерения для различных высот поднятия маятника над фотодатчиком и для каждой из них вычислить угловую и линейную скорость. Для определения ускорения маятника мы воспользовались графическим методом [9]. Построили график зависимости  $\sqrt{h}$  от времени  $t$  (рис. 2).

На основании графика сделали вывод, что движение маятника Максвелла является равноускоренным. Исходя из кинематических уравнений для равноускоренного движения, вычислили ускорение по формуле:

$$a = 2tg^2\alpha.$$

Подставив необходимые данные, получили числовое значение:

$$a = 0,162\text{м/с}^2.$$

Измерив размеры маятника и массу, вычислили его момент инерции  $J$  согласно определению:

$$J = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для сравнения результатов мы определили ускорение маятника Максвелла теоретическим методом, решив следующую задачу:

«На стержень маятника Максвелла с двух концов намотана тонкая гибкая нерастяжимая нить, массой которой по сравнению с массой маятника можно пренебречь. Свободный конец нити прикреплен к кронштейну. Маятнику предоставили возможность опускаться под действием силы тяжести. Определить линейное ускорение оси маятника».

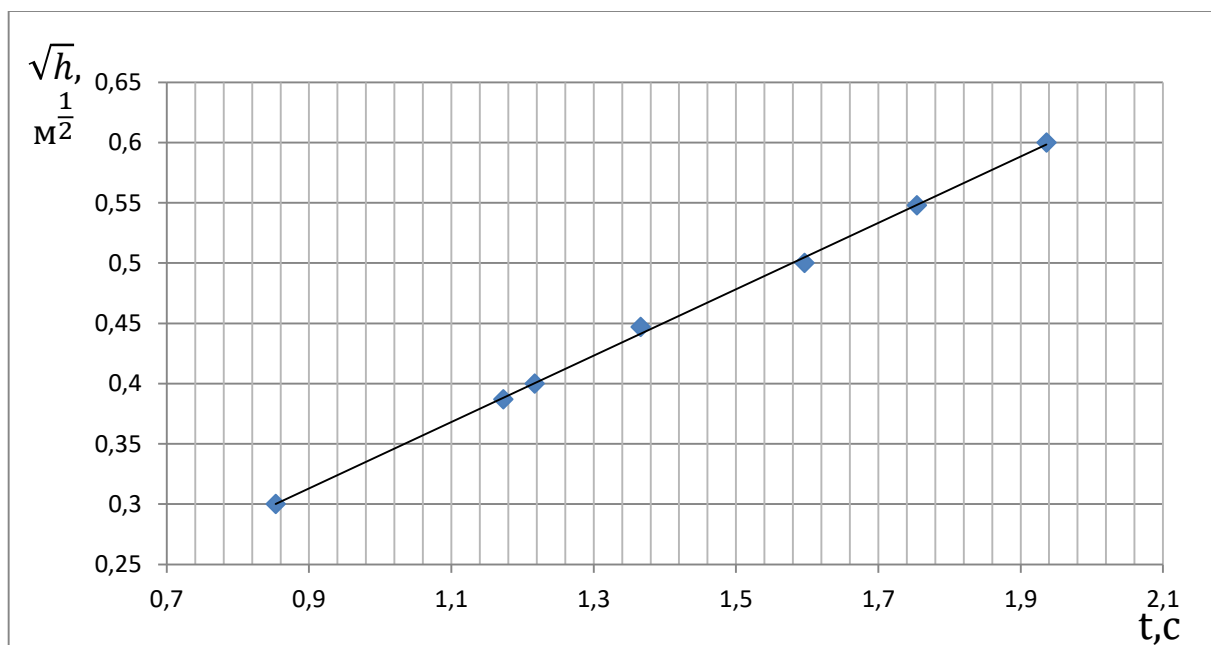


Рисунок 2 - График зависимости  $\sqrt{h}$  от времени  $t$

Решив задачу, мы получили формулу для линейного ускорения маятника:

$$a = \frac{g}{\left(1 + \frac{J}{mr^2}\right)},$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $r$  - радиус стержня маятника.

По полученной формуле вычислили ускорение поступательного движения маятника:

$$a = 0,143\text{м/с}^2.$$

Сравнив ускорения, полученные из эксперимента и по формуле, увидели, что экспериментальное ускорение больше, чем теоретическое. Мы предположили, что такое возможно из-за эффекта проскальзывания и эффекта растяжения нити.

Далее, следуя кинематическим уравнениям поступательного и вращательного движений, мы нашли линейную скорость центра масс и угловую скорость вращения маятника относительно оси, совпадающей с осью стержня по формулам:

$$v = v_0 + at,$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t,$$

где  $v, v_0$  и  $\omega, \omega_0$  - скорости центра масс маятника и угловые скорости в конечный и начальный моменты времени, соответственно;

$\varepsilon$  - угловое ускорение.

Вычислили кинетическую энергию поступательного движения маятника:

$$W_{к.пост} = \frac{mv^2}{2},$$

где  $m$  - масса маятника.

Кинетическую энергию вращательного движения маятника определили по формуле:

$$W_{к.вращ} = \frac{J \omega^2}{2}.$$

Полную кинетическую энергию движущегося маятника нашли как сумму энергий:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J \omega^2}{2}.$$

Вычислили потенциальную энергию маятника, поднятого на высоту  $h$  над фотоэлементом:

$$W_n = mgh.$$

Построили графики кинетической и потенциальной энергии (рис. 3).

По закону сохранения механической энергии для замкнутой системы с учетом формулировки теоремы Кёнига эти графики должны совпасть. Но мы видим, что кинетическая энергия  $W_k$  во всех точках меньше потенциальной энергии  $W_n$ . Порядок расхождения этих величин оказался в среднем около 8 %.

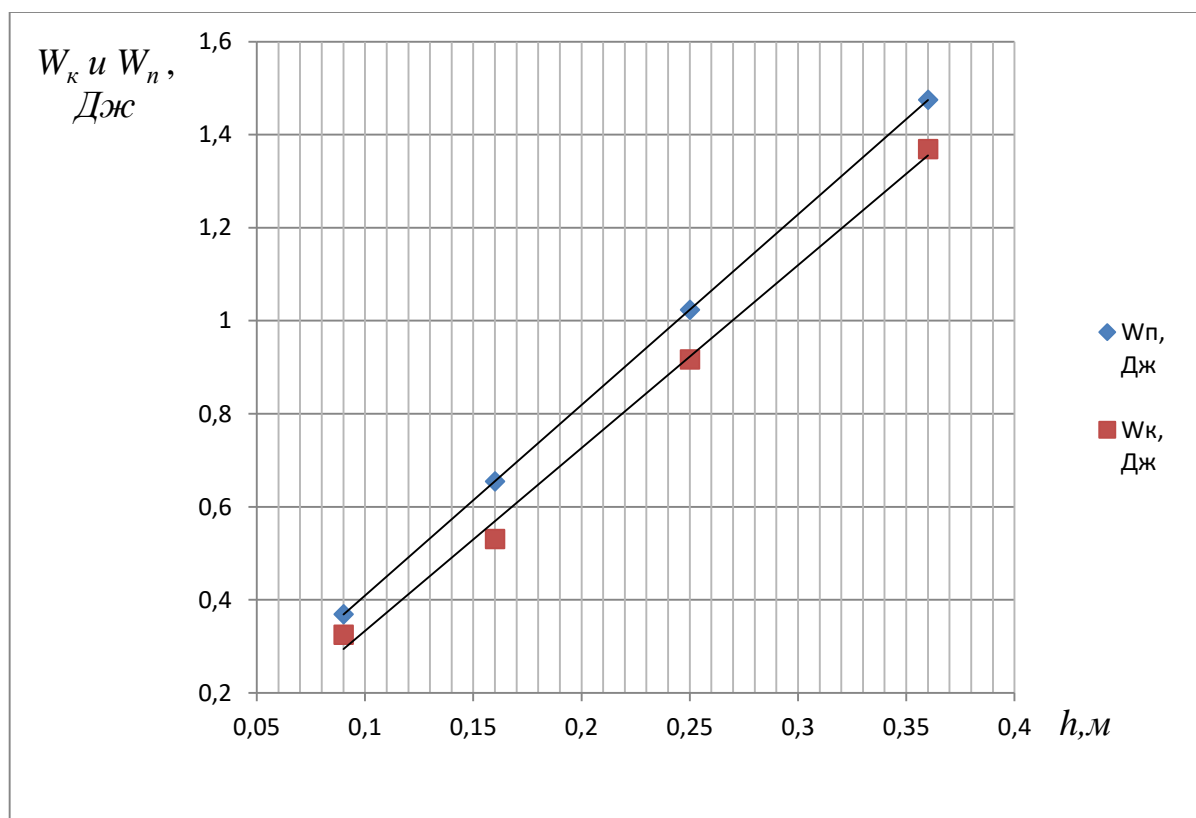


Рисунок 3 - Графики зависимости полной кинетической и потенциальной энергий  $W_k$  и  $W_n$  от высоты падения маятника  $h$

Это расхождение объясняется тем, что в реальной системе часть потенциальной энергии идет на совершение работы против сил сопротивления движению маятника. Это могут быть силы трения качения и другие силы сопротивления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных опытов, сделанных расчетов и выводов были решены поставленные задачи: в результате эксперимента теорема Кёнига подтвердилась с точностью примерно до 8 %, была решена задача о нахождении ускорения падающего маятника Максвелла, а также разработана модель лабораторной работы, посвященной проверке данной теоремы.

В ходе работы была усовершенствована установка с маятником Максвелла. Нить была заменена на более длинную, для того чтобы исследовать движение маятника на больших расстояниях.

Авторы предполагают, что практическая польза результатов работы заключается в постановке новой лабораторной работы по физике с использованием имеющихся на кафедре физики материальных ресурсов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова, И. В. Развитие и совершенствование методик физических лабораторных практикумов от второй половины XIX века до настоящего времени / И. В. Кузнецова // Ученые записки физического факультета Московского университета: научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 1-10.
2. Revinskaya O., Kravchenko N. Search of directions of modernization of a technique of a laboratory practical work in physics in technical university // Journal of International Scientific Publication: Educational Alternatives. 2011. Volume 9. Part 3.
3. Карпов, Ю. Г. Опыт модернизации классического лабораторного физического практикума с использованием современных компьютерных технологий / Ю. Г. Карпов, А. А. Повзнер, А. Н. Филанович // Новые образовательные технологии в вузе: материалы X международной научно-методической конференции. — Екатеринбург, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/10995/26729.pdf>.
4. Анищик, В. М., Буров, Л. И. Современное учебно-лабораторное оборудование для физического практикума / В. М. Анищик, Л. И. Буров // Вестник Белорусского государственного университета: электронный научный журнал. – 2006. – № 3. – С. 15-19. [Электронный ресурс]. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/17009.pdf>.
5. Желудкова, Е. А. Модернизация лабораторного практикума по физике в технических вузах в условиях реализации программы бакалавриата / Е. А. Желудкова, Е. А. Кукина, Ю. Л. Степанов // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/03/32037.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).
6. Иванов, В. Н. Механика. Молекулярная физика: методические указания к лабораторным работам. Ч. I / В. Н. Иванов, А. Г. Туровец. – Омск: ОмГТУ, 2013.
7. Новикова, Т. А. Лабораторный практикум по физике. Ч. 1 / Т. А. Новикова, А. В. Белослудцев. – Ижевск: УдГУ, 2010. – 140 с.
8. Механика и молекулярная физика: практикум / И. А. Лыков [и др]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 104 с.
9. Крукович, Н. П. Механика и молекулярная физика: учеб.-метод. пособие. Ч. 1 / Н. П. Крукович. - Калининград: ФГБОУ ВПО "КГТУ" БГАРФ, 2018. - 148 с.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF KOENIG'S THEOREM

S. N. Vinogradov, student,  
e-mail: sergey.vinogradov.04@mail.ru  
"Kaliningrad State Technical University"  
Baltic Fishing Fleet State Academy

N. P. Krukovich, PhD in Engineering,  
Associate Professor of the Department of Physics  
e-mail: krukovichnina@mail.ru  
"Kaliningrad State Technical University"

The article presents one of the methods for testing the Koenig's theorem on kinetic energy experimentally using laboratory equipment of the Baltic Fishing Fleet State Academy. During the search for a suitable installation, it turned out that the Maxwell's pendulum is the most suitable for testing the theorem. This work has an applied character and can form the basis for the formation of a new laboratory work for its subsequent implementation by cadets in order to study physics.

**Keywords:** *mechanics, rotational motion, Koenig's theorem, mechanical energy, Maxwell's pendulum*