

## **Автоматизированный исследовательский комплекс по теоретической механике**

© В.В. Дубинин, В.В. Витушкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Разработан автоматизированный исследовательский комплекс по основным разделам теоретической механики и теории колебаний, отвечающий современному уровню научных исследований и ведения учебного процесса. Комплекс обеспечивает математическое и физическое моделирование и исследование реальных физических процессов на модельных установках, в частности основных процессов промышленных объектов. Установки снабжены необходимыми датчиками измерений и контроля их работы, ЭВМ и соответствующим программным обеспечением.*

**Ключевые слова:** *теоретическая механика, теория колебаний, лабораторные исследовательские комплексы, математическое моделирование, физический эксперимент.*

В результате многолетней научно-методической работы, проводимой на кафедре «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию и совершенствованию автоматизированного исследовательского комплекса, разработан оригинальный комплект лабораторного оборудования, отвечающего современному высокому уровню информационных технологий и методик организации учебного процесса [1–4]. Работа включала в себя два направления: создание научного комплекса и развитие учебного процесса в соответствии с требованиями к материально-техническому обеспечению учебного процесса по дисциплине «Теоретическая механика».

В настоящее время в состав автоматизированного исследовательского комплекса по отдельным разделам теоретической механики и теории колебаний входят девять лабораторных установок, каждая из которых содержит физическую (механическую) установку, программный комплекс управления ее работой, датчики измерений и контроля работы установки, ПЭВМ и необходимые технические устройства записи и обработки данных. В механических установках моделируется работа различных узлов больших промышленных объектов, для которых можно создавать любые физические модели процессов, проходящих в промышленной установке (нелинейности, обратные связи и т. д.). Автоматизация всех этапов проведения исследований на данном исследовательском комплексе реализуется с помощью программного обеспечения, выполненного как в оригинальном, разработанном на кафедре исполнении, так и на основе аппаратно-программных средств

фирмы National Instruments — модулей ввода-вывода сигналов и программной системы LabView версии 7.0.

Комплекс построен на основе принципа выявления и исследования взаимосвязи между теоретическим описанием процесса (явления), результатами его математического моделирования и экспериментальным исследованием физических процессов, реализуемых в лабораторных установках. Результаты экспериментов обрабатываются на ПЭВМ и отображаются в реальном времени. Ниже приведено описание назначения, возможностей и основных конструктивных особенностей лабораторных установок.

Установка «**Качение тел по наклонной плоскости**» позволяет экспериментально изучать кинематические параметры плоскопараллельного движения по наклонной плоскости двух твердых тел с одинаковыми массой  $m$  и радиусом  $r$ , но с разными осевыми моментами инерции  $J_{Cz}$  (рис. 1).

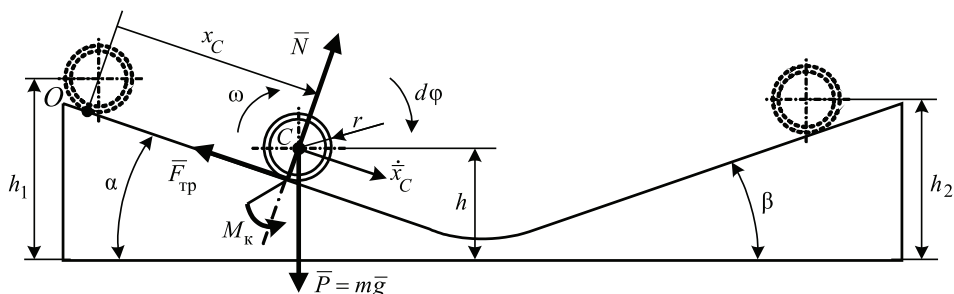


Рис. 1. Схема установки «Качение тел по наклонной плоскости»

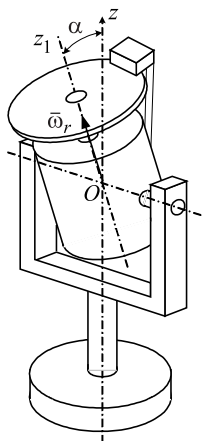
Оба тела начинают движение одновременно с одной и той же высоты  $h_1$  и при условии равенства потерь механической энергии поднимаются на одинаковую высоту  $h_2$ . На рис. 1 для произвольного положения тела с текущими значениями координат его центра масс  $x_C$  и  $h$ , угловой скорости  $\bar{\omega}$  и элементарного углового перемещения  $d\varphi$  в плоскости движения показаны силы, действующие на тело: сила тяжести  $\bar{P}$ , нормальная реакция  $\bar{N}$ , сила трения скольжения  $\bar{F}_{тр}$  и момент трения качения  $M_k$ . Каждое тело движется по двум токопроводящим направляющим с углами наклона  $\alpha$  и  $\beta$ . При этом одна из направляющих каждого тела разделена на отдельные поперечные сегменты, электрически соединенные между собой посредством резисторов. Таким образом, каждая пара направляющих представляет собой реостат, подвижным контактом которого является катящееся тело. Электрические сигналы с этих реостатов поступают в ПЭВМ и обрабатываются в режиме реального времени. Это позволяет опреде-

лить экспериментальные значения пройденных расстояний  $x_C$ , скоростей  $\dot{x}_C$  и ускорений  $\ddot{x}_C$  центров масс тел, построить их зависимости от времени и сравнить эти данные с расчетными (теоретическими). Кроме того, при условии учета потерь энергии только от действия момента трения качения  $M_k = f_k N = f_k mg \cos \alpha$  можно определить значение коэффициента трения качения  $f_k$ .

Лабораторная установка «**Закон сохранения кинетического момента**» предназначена для демонстрации и исследования выполнения закона сохранения кинетического момента механической системы относительно неподвижной вертикальной оси  $Oz$  (рис. 2).



а



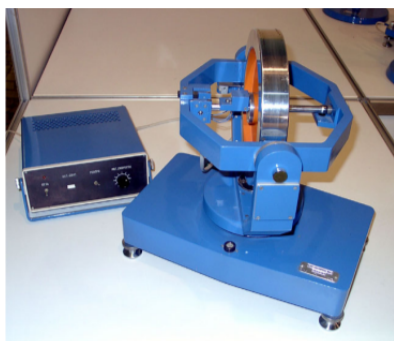
б

Рис. 2. Общий вид (а) и схема (б) лабораторной установки

С помощью этого комплекса можно наблюдать и анализировать движение системы при различных вариантах вращения вокруг оси  $Oz_1$  тела, входящего в состав системы (ротора электродвигателя). Установка снабжена индуктивными датчиками для измерения угловых скоростей вращения вокруг осей  $Oz_1$  и  $Oz$ . При работе установки, включая двигатель, сообщают ротору угловую скорость  $\bar{\omega}_r$  относительно оси  $Oz_1$ , которую устанавливают под углом  $\alpha$  к вертикали, принимающим значения от нуля до  $90^\circ$ . При этом вся система начинает вращаться вокруг оси  $Oz$ , и при изменении  $\bar{\omega}_r$ , вследствие закона сохранения кинетического момента соответственно изменяется и угловая скорость вращения системы относительно оси  $Oz$ .

Для исследования гироскопических явлений в данный комплекс введены две установки. Реализованная в установке «**Двухстепенной гироскоп**» модель гироскопа (рис. 3, а) позволяет демонстрировать

действие гироскопического момента на гироскоп с тремя степенями свободы, а при двух степенях свободы гироскопа она может быть использована в качестве измерителя угловой скорости.



а

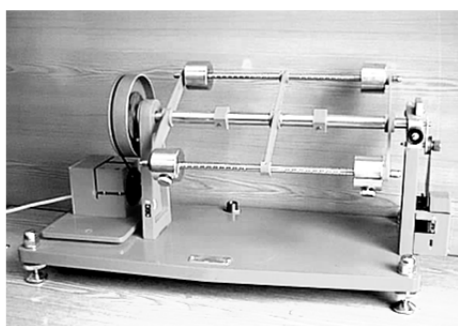


б

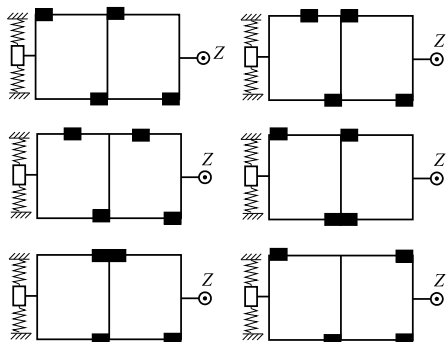
Рис. 3. Общий вид установок «Двухстепенной гироскоп» (а) и «Бегуны» (б)

Установка **«Бегуны»** представляет собой модель мельничных бегунов, шарнирно закрепленных на вертикальной оси, связанной с приводом вращения. Она позволяет проводить измерения гироскопических давлений «бегунов» на горизонтальную поверхность (подпружиненную платформу) при различных скоростях вращения (рис. 3, б).

Лабораторный комплекс **«Динамические реакции подшипников»** предназначен для демонстрации и исследования реакций подшипников в динамически несбалансированной механической системе (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4. Общий вид установки «Динамические реакции подшипников» (а) и возможные схемы размещения грузов на рамке (б)

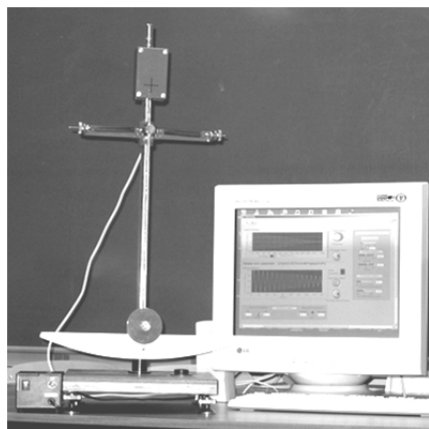
Электромеханическая установка содержит рамку, вращающуюся вокруг продольной оси симметрии, на сторонах которой установлены

четыре груза. Грузы могут быть закреплены в различных положениях вдоль сторон рамки, что обеспечивает получение динамической неуравновешенности (рис. 4, б). Установка оснащена датчиками угловой скорости рамки и горизонтального перемещения одного из подшипников рамки. Этот подшипник выполнен «плавающим», т. е. может перемещаться в направлении, перпендикулярном оси вращения рамки с поворотом ее вокруг вертикальной оси  $z$ . Перемещение подшипника ограничено двумя пружинами, степень деформации которых обеспечивает возможность измерения динамической реакции подшипника.

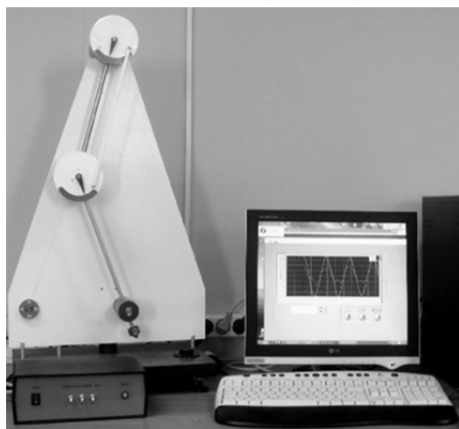
Данная лабораторная установка позволяет получать зависимости этой реакции от угловой скорости рамки и исследовать явления резонанса, т. е. определять значения критических скоростей вращения для различных вариантов динамической неуравновешенности.

Для исследования свободных колебаний механических систем в комплексе имеются две установки.

Лабораторная установка «**Физический маятник**» предназначена для исследования свободных колебаний физического маятника в широком диапазоне изменения его момента инерции и моментов сил относительно оси подвеса за счет перемещения точек крепления груза и присоединения пружин к стержню маятника (рис. 5, а).



а



б

**Рис. 5.** Общий вид установок «Физический маятник» (а) и «Двойной маятник» (б)

На оси подвеса маятника установлен датчик его углового отклонения (потенциометр). Экспериментальные результаты сравниваются с результатами математического моделирования, что позволяет, в частности, определить действительные значения коэффициентов вязкого и сухого трения в потенциометре.

В лабораторной работе «**Двойной маятник**» реализуется экспериментальный метод детального и наглядного изучения колебатель-

ного движения системы с двумя степенями свободы (рис. 5, б). Механическая установка для этой работы представляет собой стенд с вертикальной панелью, на которой установлен двойной маятник, состоящий из двух тонких шарнирно сочлененных стержней с массивными телами на концах. Маятник снабжен датчиками угловых положений его частей, а также фиксаторами его начальных положений. По показаниям этих датчиков определяются парциальные и главные колебания двойного маятника.

Вынужденные колебания механических систем в данном комплексе исследуются на следующих двух установках.

Стенд лабораторной установки «**Вынужденные колебания механической системы с инерционным возмущением**» представляет собой систему, состоящую из тележки, перемещающейся по неподвижному основанию в горизонтальном направлении, и закрепленного на тележке маятника, перемещающегося в вертикальной плоскости в том же направлении (рис. 6, а). Маятник приводится в колебательное движение с помощью двигателя, установленного на тележке, и создает возмущающее воздействие на нее.

Стенд лабораторного комплекса «**Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы**» представляет собой систему, состоящую из установленного на горизонтальной оси диска, соединенного через спиральную пружину с рычагом кривошипно-шатунного механизма привода (рис. 6, б).



а



б

**Рис. 6.** Лабораторные установки вынужденных колебания механической системы

Установки позволяют получать амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики вынужденных колебаний, а также анализировать особенности колебательных движений систем с одной степенью свободы при инерционном возмущении и возмущении через упругий элемент.

Поскольку дифференциальные уравнения движения многих промышленных объектов аналогичны уравнениям данных установок, то

исследования последних позволяют получать АЧХ и ФЧХ для реальных установок при одинаковых значениях добротности модели и натурального объекта ( $Q_m = Q_n$ ).

Таким образом, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана автоматизированный исследовательский комплекс по основным разделам теоретической механики обеспечивает математическое и физическое моделирование и исследование механических процессов реальных промышленных объектов. В учебном процессе проведение лабораторных работ на установках комплекса с одновременной обработкой результатов в режиме реального времени позволяет наглядно подтвердить теоретические положения механики и теории колебаний, что способствует более прочному и глубокому усвоению основных разделов дисциплины.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дубинин В.В. Физический эксперимент в некоторых задачах механики. *Тр. зонального совещания-семинара заведующих кафедрами теоретической механики Центрального и Приволжского федеральных округов РФ*. Ульяновск, 2002, с. 14–15.
- [2] Дубинин В.В., Витушкин В.В., Назаренко Б.П. Современный лабораторный комплекс по теоретической механике. Сб. Интеграция образования, науки и производства. *Материалы секционного заседания Междунар. конф. IX Междунар. форума «Высокие технологии XXI века»*, Москва, 23 апреля 2008 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с. 153–156.
- [3] Дубинин В.В., Витушкин В.В., Дубровина Г.И. Физический эксперимент, математическое моделирование и информационные методы обработки данных в механике. Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. *Междунар. сб. науч. тр.* Гомель, Изд-во БГУТ, 2009.
- [4] Дубинин В.В., Витушкин В.В. Исследовательский комплекс динамики механических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/articles/286/286.pdf>

Статья поступила в редакцию 29.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дубинин В.В., Витушкин В.В. Автоматизированный исследовательский комплекс по теоретической механике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 12.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pedagogika/hidden/1343.html>

**Дубинин Владимир Валентинович** родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области теоретической и прикладной механики. e-mail: [fn3@bmstu.ru](mailto:fn3@bmstu.ru)

**Витушкин Вячеслав Валентинович** родился в 1942 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области прикладной аэрогазодинамики и теоретической механики. e-mail: [fn3@bmstu.ru](mailto:fn3@bmstu.ru)

## **An automated research complex on theoretical mechanics**

© V.V. Dubinin, V.V. Vitushkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents a novel automated research complex on the basic parts of the theoretical mechanics and the theory of oscillations that corresponds to up-to-date level of scientific investigations and educational process. The complex makes possible mathematical modeling and physical simulation of real physical processes using model installations, specifically those of main processes in industrial objects. The installations are equipped with necessary measuring and control elements, as well as computers and corresponding software.*

**Keywords:** *the theoretical mechanics, the theory of oscillations, laboratory research complexes, mathematical modelling, physical experiment.*

### REFERENCES

- [1] Dubinin V.V. Fizicheskiy eksperiment v nekotorykh zadachakh mekhaniki [Physical experiment in some problems of mechanics]. *Trudy zonalnogo soveschaniya-seminara zaveduyuschikh kafedrami teoreticheskoy mekhaniki Tsentralnogo i Privolzhskogo federalnykh okrugov RF* [Works of the zonal meeting-seminar of the heads of the departments of Theoretical Mechanics of the Central and Volga federal districts of the Russian Federation.]. Ulyanovsk, 2002, pp. 14–15.
- [2] Dubinin V.V., Vitushkin V.V., Nazarenko B.P. Sovremennyye laboratornyye komplekсы po teoreticheskoy mekhanike. Sbornik Integratsiya obrazovaniya, nauki i proizvodstva [The modern laboratory facilities on theoretical mechanics. Coll. Integration of education, science and industry]. *Materialy sektionnogo zasedaniya Mezhdunarodnoy konferentsii IX Mezhdunarodnogo foruma "Vysokie tekhnologii XXI veka"* [Materials of the sectional meeting of Int. Conf. IX Int. Forum "High Technologies of XXI Century"]. Moscow, April 23, 2008. Moscow, BMSTU, 2008, pp. 153–156.
- [3] Dubinin V.V., Vitushkin V.V., Dubrovina G.I. Fizicheskiy eksperiment, matematicheskoe modelirovaniye i informatsionnyye metody obrabotki dannykh v mekhanike. Mekhanika. Nauchnyye issledovaniya i uchebno-metodicheskiye razrabotki [Physical experiment, mathematical modeling and information processing techniques in mechanics. Mechanics. Research and learning aids]. *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Int. Coll. of scientific papers]. Gomel, BSUT Publ., 2009.
- [4] Dubinin V.V., Vitushkin V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2012, iss. 7. Available at: <http://engjournal.ru/articles/286/286.pdf>

**Dubinin V.V.** (b. 1937) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph.D., assoc. professor of the Department of Theoretical Mechanics at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 scientific publications in the field of theoretical and applied mechanics. e-mail: [fn3@bmstu.ru](mailto:fn3@bmstu.ru)

**Vitushkin V.V.** (b. 1942) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph.D., assoc. professor of the Department of Theoretical Mechanics at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 scientific publications in the field of applied aerogas dynamics and theoretical mechanics. e-mail: [fn3@bmstu.ru](mailto:fn3@bmstu.ru)