ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.00 – МЕХАНИКА, 05.02.00 – МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ, 05.04.00 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, 05.05.00 – ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

2019 Том 20 / 1 (222)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Уразбахтин Р.Р., Веселов А.М., Минияров А.Х. Сферический генератор 3

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Хунузиди Е.И., Благовещенский Д.И. Управление качеством изделий, используемых в сборочном производстве 7

Трение и смазка в машинах и механизмах

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Разработка дисковых остановочных тормозов с металлокерамическими дисками в трансмиссиях гусеничных машин и математическая модель нагружения фрикционного материала 12

Шишкарев М.П. Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты с раздельными узлами трения 18

Ноженков М.В. Постоянная тонкой структуры и вихревой рост кристаллов . . . 25

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2018 году 46

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — **84967**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета
В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н.
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

ПЕРМЬ
С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

РОСТОВ-НА-ДОНУ
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА
Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК
А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

ТУЛА
А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК
В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша
П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2019

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.00 — MECHANIC, 05.02.00 — MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE, 05.04.00 — POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING, 05.05.00 — TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MECHANICAL ENGINEERING

2019 Vol. 20 **1 (222)**

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbakhtin R.R., Veselov A.M., Miniyarov A.Kh. Spherical generator 3

Quality assurance. Testing. Monitoring

Khunuzidi E.I., Blagoveshhenskiy D.I. Product quality management used in assembly production 7

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Krykhtin Yu.I., Karlov V.I. Development of the disc stopping brakes with metal-ceramic discs in the transmissions of caterpillar vehicles and the mathematical model of friction material loading 12

Shishkarev M.P. Synthesis and analysis of adaptive friction clutches with separate friction 18

Nozhenkov M.V. The fine-structure constant and the vortex growth of the crystals 25

Information

Index of articles published in 2018 46

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96
E-mail: sborka@mashin.ru, http://www. mashin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
V.I. KOLESNIKOV

Editors

MOSCOW
A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV
ROSTOV-ON-DON
A.A. RYZHKIN
RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV
ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV
TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN
TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS
KHABAROVSK
V.I. SCHPORT
Belarus
MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI
Ukraine
KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV
Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2019

УДК 621.313.84

Ф.Р. Исмагилов, *д-р техн. наук,* **В.Е. Вавилов,** *канд. техн. наук,*
Р.Р. Уразбахтин, А.М. Веселов, А.Х. Минияров
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: urr98@mail.ru

Сферический генератор*

Рассмотрена проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований относительно их подвижности и массогабаритных показателей. В качестве привода для манипулятора может выступать сферический электродвигатель, в котором обеспечивается полностью управляемое перемещение ротора по трем степеням свободы. Предложен вариант сферического генератора на основе сферического электродвигателя.

The problem of designing new-generation manipulators in the world is urgent in connection with the increase of the requirements regarding to their mobility and mass-dimensional parameters is considered. As a drive for the new-generation manipulator, a spherical electric motor can act in which a fully controlled displacement of the rotor is provided in three degrees of freedom. In version of a spherical generator based on a spherical electric motor is proposed.

Ключевые слова: сферический электродвигатель, сферический генератор, конструкция, моделирование, вращение ротора.

Keywords: spherical electric motor, spherical generator, design, simulation, rotor spinning.

Введение

В настоящее время в мире актуальна проблема проектирования манипуляторов нового поколения в связи с повышением требований к их подвижности. Сервоприводы существующих манипуляторов обладают только одной степенью свободы движений, что обусловливает ограниченную подвижность систем, в которых их используют. В связи с этим для обеспечения движения по каждой дополнительной степени свободы требуется установка отдельного сервопривода, что влечет за собой усложнение конструкции системы управления и механизма, в котором применяют привод, к увеличению массы конструкции и снижению надежности. Данная проблема решается, если создать электромеханическую систему, обеспечивающую управление движением манипулятора по трем степеням свободы с использованием одного привода [1].

В качестве такой электромеханической системы может выступать сферический электродвигатель. Основное требование к конструкции сферического электродвигателя — обеспечение полностью управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы и достижение при этом достаточной точности позиционирования.

Сферический генератор на основе сферического электродвигателя предложено применять в ограниченных по размерам областях, где существует сконцентрированный поток газа (например, труба с потоком воздуха системы вентиляции или вытяжка промышленного производства).

Аналог предлагаемого сферического генератора — ветроэнергетическая установка, которая состоит из закрепленного на вертикальной стойке корпуса в форме шара. Нижняя часть шара представляет собой ветроприемник с ребрами и направляющими поверхностями, обеспечивающими подачу воздушного потока из нижней в верхнюю часть корпуса, и отделена кольцевым обтекателем от верхней части, выполненной

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-38-60001.

в виде гладкой обтекаемой полусферы. На стойке также закреплены аэродинамическая турбина и электрогенератор на постоянных магнитах [2]. Недостатки ветроэнергетической установки — большие масса и размеры, т. е. невозможность ее применения в ограниченном пространстве с потоком газа.

Задача сферического генератора заключается в снижении массы и габаритных размеров установок, которые используют для преобразования энергии потока газа в электроэнергию. Применение ротора сферической формы повышает эффективность установок.

Конструкция и принцип действия сферического генератора

Рассмотрим сферический генератор, установленный в трубу с потоком сконцентрированного газа (рис. 1).

Электромагниты статора механически соединены с кольцевым постоянным магнитом посредством креплений и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга в вершинах правильного треугольника, вписанного в окружность, образованную постоянным кольцевым магнитом в горизонтальной плоскости. Крепления для постоянного кольцевого магнита выполнены из электроизоляционного материала. Постоянные магниты механически соединены со сферическим ротором так, что поверхности постоянных магнитов и сферического ротора в совокупности образуют сферическую поверхность. Постоянные магниты расположены на диаметральных окружностях сферического ротора в вертикальной и горизонтальной плоскостях так, что на сферическом роторе шесть постоянных магнитов размещены на одинаковом расстоянии друг от друга. Сферический ротор с постоянными магнитами позиционируется на одинаковом расстоянии от электромагнитов статора в центре окружности, описанной вокруг правильного треугольника, вписанного в окружность, образованную в горизонтальной плоскости кольцевым постоянным магнитом. Сферический ротор выполняют полым из немагнитного материала. Аэродинамические ребра, выполнены так, что при прохождении по ним потока газа ротор с постоянными магнитами на нем приходит во вращение. Сферический генератор механически крепится к трубе с потоком газа. Труба и крепления изготовлены из немагнитного диэлектрика. Крепления для установки сферического генератора в трубу с потоком газа выполнены обтекаемой формы так, чтобы при

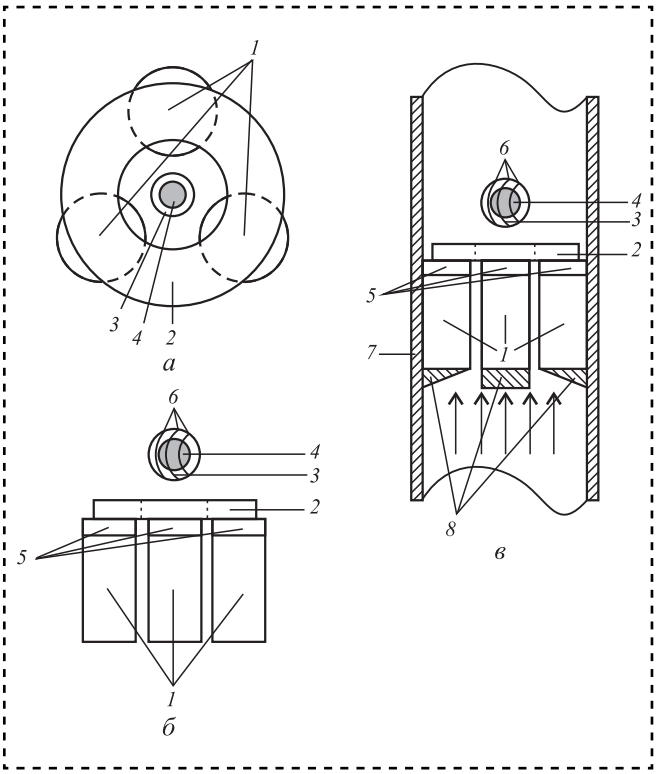


Рис. 1. Сферический генератор:
а — вид сверху; *б* — вид спереди; *в* — в трубе с потоком газа; *1* — электромагниты статора; *2* — постоянный кольцевой магнит; *3* — сферический ротор; *4* — постоянные магниты; *5* — крепления постоянного кольцевого магнита; *6* — аэродинамические ребра сферического ротора; *7* — труба с потоком газа; *8* — крепления для установки сферического генератора в трубу с потоком газа

прохождении по ним потока газа не нарушалась работа сферического генератора и не происходило отклонений ротора с постоянными магнитами от места их позиционирования.

Сферический генератор работает следующим образом. При движении газа в трубе ротору сферического генератора придается вращение за счет формирования завихрений потока газа посредством аэродинамических ребер. Взаимодействием постоянных магнитов с постоянным кольцевым магнитом и электромагнитами статора в электромагнитах статора наводится ЭДС за счет изменения магнитного поля, образованного постоянным кольцевым магнитом и постоянными магнитами. Постоянный кольцевой магнит обеспечивает магнитное взаимодействие с постоянными магнитами в случае прекращения подачи потока газа. Крепления для постоянного кольцевого магнита в формировании и изменении магнитного поля, образованного постоянным кольцевым магнитом и постоянными магнитами, не участвуют.

Рассмотрим условие равновесия ротора при воздействии на него потока газа:

$$R = mg,$$

где R — результирующая сила, действующая со стороны сконцентрированного потока газа;

mg — сила тяжести.

Так как размеры сферического ротора малы, сделаем допущение, что распределение магнитного поля постоянных магнитов ротора аналогично тому, что образуется вокруг постоянного магнита, представляющего собой шар, и сам ротор по распределению массы близок к постоянному магниту.

При вращении сферического ротора возникает изменяющееся во времени магнитное поле. Вертикальная составляющая магнитного поля — функция от расстояния между ротором и статором сферического генератора по вертикальной оси:

$$H_z = \sqrt{1 - \frac{z - z_л}{1,5r}} H_л, \qquad (1)$$

где r — радиус ротора сферического электродвигателя.

Ротор сферического генератора стабилизируется на определенной выбранной высоте, на которой присутствует составляющая магнитного поля $H_л$. Для расчетов $H_л$ определяется экспериментально.

Результирующая сила, действующая со стороны ротора на электромагниты статора, выражается через напряженность магнитного поля на высоте левитации:

$$R = \frac{3}{8}\pi\chi_к\mu_0 H_л^2 r^2, \qquad (2)$$

где $\chi_к$ — кажущаяся магнитная проницаемость;

μ_0 — магнитная постоянная.

Из уравнений (1) и (2) определяем радиус ротора сферического генератора.

Связь между напряженностью магнитного поля на высоте позиционирования ротора и вектором магнитной индукции в этой же точке задается следующим соотношением:

$$B_л = \mu H_л.$$

Динамика ротора сферического генератора

Опишем динамику ротора сферического генератора при условии, что ротор неподвижен в горизонтальной плоскости и позиционируется строго на выбранной высоте.

Ротор сферического генератора может вращаться в направлении каждой из трех координатных осей декартовой прямоугольной системы координат.

Уравнения перемещения определим исходя из изменений углов φ_1, φ_2 и φ_3 в трех плоскостях. Запишем уравнения для изменения угловых скоростей ω_i ротора по трем плоскостям:

$$\begin{cases} \omega_1 = \dfrac{d\varphi_1}{dt}; \\ \omega_2 = \dfrac{d\varphi_2}{dt}; \\ \omega_3 = \dfrac{d\varphi_3}{dt}. \end{cases}$$

Тогда уравнения движения для ротора сферического генератора преобразуем к виду:

$$\begin{cases} I\dfrac{d^2\varphi_1}{dt^2} = \left(mg + \sum F_1\right)R; \\ I\dfrac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \left(mg + \sum F_2\right)R; \\ I\dfrac{d^2\varphi_3}{dt^2} = \left(mg + \sum F_3\right)R, \end{cases}$$

где I — момент инерции ротора сферического генератора;

F_i — сила, действующая на ротор со стороны электромагнитов статора в рассматриваемой плоскости вращения ротора.

Расчет токов и напряжений в электромагнитах сферического генератора

Запишем уравнения для нахождения тока в каждом из электромагнитов статора. С учетом того, что расстояние между электромагнитами и взаимная индуктивность электромагнитов статора одинаковы, а также перемещение постоянных магнитов ротора относительно электромагнитов статора пренебрежимо мало, уравнение равновесия для сферического генератора имеет вид:

$$U_i = i_i R + L_i \frac{di_i}{dt} + \sum_{j=1}^{2} M \frac{di_j}{dt}.$$

Проведя алгебраические преобразования в результате получим:

$$\begin{cases} \dfrac{di_1}{dt} = \dfrac{M\left(-U_1 + U_2 + U_3\right) - LU_1}{-ML + M^2 - L^2} + \\ + \dfrac{R\left(M\left(i_1 - i_2 - i_3\right) + Li_1\right)}{-ML + M^2 - L^2}; \\ \dfrac{di_2}{dt} = \dfrac{M\left(-U_2 + U_1 + U_3\right) - LU_2}{-ML + M^2 - L^2} + \\ + \dfrac{R(M\left(i_2 - i_1 - i_3\right) + Li_2)}{-ML + M^2 - L^2}; \\ \dfrac{di_3}{dt} = \dfrac{M(-U_3 + U_1 + U_2) - LU_3}{-ML + M^2 - L^2} + \\ + \dfrac{R(M\left(i_3 - i_1 - i_2\right) + Li_3)}{-ML + M^2 - L^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где L — индуктивность электромагнита статора;

M — взаимная индуктивность электромагнитов статора;

i_i и U_i — ток и напряжение рассматриваемого электромагнита статора соответственно.

Уравнение (3) позволяет смоделировать ток, который должен протекать в каждом из электромагнитов статора сферического генератора.

Моделирование вращения ротора сферического генератора

Последний этап проектирования сферического генератора — моделирование вращения ротора сферического генератора при подаче на него сконцентрированного потока газа (рис. 2 на стр. 2 обложки).

Для того чтобы ротор сферического генератора вращался со скоростью 150 рад/с (см. рис. 2, *а*), необходимо формирование потока газа за счет аэродинамических ребер, которые выполняются на роторе сферического генератора (см. рис. 2, *б*).

Заключение

Предложен новый вариант исполнения генератора — сферический генератор. Найдены выражения для подбора параметров ротора сферического генератора: уравнения движения, выражения для токов, которые возникают в электромагнитах статора при вращении сферического ротора. Проведено моделирование аэродинамики ротора предлагаемого сферического генератора.

Библиографический список

1. **Липин А.В.** Разработка и исследование трехкоординатного электропривода для манипуляторов. URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Autoreferats/LipinAV.pdf, pdf (дата обращения: 05.07.2018).

2. **Пат. 2275601 РФ, МПК G01C 19/24.** Трехосный гиромотор / Воскобойников Р.Л., Воскобойников Л.Р.; заявл. 04.11.2004; опубл. 27.04.2006. Бюл. № 12.

3. **Пат. 2644000 РФ, МПК[7] F03D9/25, F03D3/04.** Ветроэнергетическая установка / Криулин Ю.В., Коробов М.Л.; патентообладатель ООО "Аэроглоуб". 2018.

4. **Постоянные** магниты: справочник / А.Б. Альтман и др. М.: Энергия, 1980.

5. **Кислицын А.Л.** Синхронные машины. Ульяновск: УлГТУ, 2000.

УДК 658.562

Е.И. Хунузиди, *канд. техн. наук (НИТУ "МИСиС"),*
Д.И. Благовещенский, *канд. техн. наук (ФБУ "Тульский ЦСМ")*
E-mail: el_hun@mail.ru

Управление качеством изделий, используемых в сборочном производстве

Рассмотрены вопросы управления качеством изделий, используемых в сборочном производстве, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001, в котором регламентированы требования к процессам. Проанализированы возможные варианты коррекции технологического процесса серийного изготовления метизных изделий, используемых в сборочном производстве. Исследовано четыре системных архетипа и проведены оценки значений вероятности принятия решений и действий, приводящих к браку.

Product quality management questions according to GOST R ISO 9001 are considered. Requirements to processes are regulated in this standard. Possible correction options of serial production of the hardware products used in assembly production technological process are analysed. Four system archetypes are investigated. Estimates of values of probability of decision-making and the actions leading to marriage are carried out.

Ключевые слова: управление качеством продукции, моделирование технологического процесса, оперативный контроль качества, системный архетип, процессный подход, стабильность, воспроизводимость.

Keywords: product quality management, technological process modeling, operating quality control, system archetype, process approach, stability, reproducibility.

Управление качеством — стратегическое решение для любой организации. Оно помогает улучшить результаты ее деятельности. Применение управления качеством способствует стабильному производству продукции в управляемых условиях технологического процесса. Это один из эффективных аналитических инструментов, позволяющий принимать основанное на "голосе самой системы" решение о том, надо ли вмешиваться в технологический процесс, и если надо, то на каком уровне и с какой целью — статистическое мышление [1, 2]. Для определения способности процесса соответствовать установленным требованиям используют индексы пригодности и воспроизводимости. Но фактически понятие воспроизводимости и соответствующие индексы применимы только для процесса, находящегося в состоянии статистической управляемости [3, 4]. Незнание или неумение использовать этот инструмент приводит к тому, что корректирующие и предупреждающие действия не достигают желаемых результатов, и технологический процесс производства либо не изменяется, либо ухудшается. Поэтому важно правильно использовать системный подход при анализе процессов. Системный подход — это обобщающий ряд методов системного анализа, предназначенных для более легкого восприятия целостности явлений и способствующих более легкому внедрению изменений. Он основывается на определении так называемых системных архетипов — наиболее часто встречающихся и регулярно повторяющихся ситуаций несистемных подходов к решению проблем [5, 6].

В целях улучшения управления качеством изделий, используемых в сборочном производстве, предложено объединить методологию статистического мышления [2], системный подход и процессный подход [7, 8], уделяя внимание риск-ориентированному мышлению. Это необходимо в силу того, что применению необъединенного подхода присущи следующие недостатки:

сложность и, в ряде случаев, неоперациональность;

анализ только на уровне организации в целом;

отсутствие учета вариабельности процессов.

Именно для устранения указанных недостатков предпринята попытка соединения этих подходов.

Процессный подход при использовании цикла PDCA сам по себе не может гарантировать успеха действиям, поскольку по умолчанию предполагается, что на этапе "Проверка" правильно оценивается состояние системы, а на этапе "Воздействие" принимаются адекватные меры по улучшению системы [7, 8]. Системный подход сам по себе тоже оказывается недостаточным. Рассмотрим, например, такой часто встречающийся архетип, как неработающее решение (рис. 1).

Существует некая проблема, приводящая к браку изделий, используемых в сборочном производстве. Для ее устранения принимается решение, которое на самом деле не работает (на рис. 1 возвращающая стрелка от решения к той же проблеме). В результате через некоторое время происходит задержка и возникают непредвиденные последствия, а проблема остается, и как результат — в конце технологического процесса брак изделий. Понимание этого архетипа чрезвычайно важно для совершенствования в организации деятельности любого вида, в том числе для совершенствования управления качеством сборочных единиц. Но рис. 1 настолько общий, что не пригоден для практического ответа на вопрос: как операционально отличить работающее решение от неработающего, потому что он применим к любым неработающим решениям и, как таковой, ничего не дает для анализа

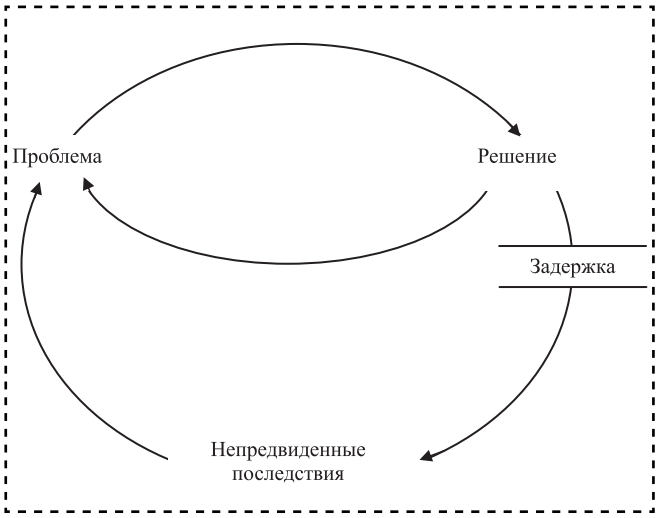


Рис. 1. Архетип "Неработающее решение"

конкретной ситуации. В данном случае можно применить статистическое мышление, которое отвечает на вопрос (хоть и не всегда): как на практике и однозначным образом (т.е. операционально) отличить заведомо неработающее решение от потенциально работоспособного?

Вмешиваться в систему управления качеством могут люди, непосредственно находящиеся в ней, т.е. линейный персонал, и высшее руководство, отвечающее за всю систему управления качеством в целом. Обычно высшее руководство находится на некотором расстоянии от собственно процессов и потому имеет более или менее искаженную информацию о том, что происходит в системе управления качеством.

Система управления качеством распространяет вокруг себя информацию о своем состоянии и выдает информацию о своих проблемах, следовательно, и о способах ее улучшения. Одна из основных задач управления качеством заключается в том, что эту информацию надо правильно оценить и принять решение: надо ли вмешиваться в систему, если надо, то с какой целью, и кому — линейному персоналу или высшему руководству [2].

Возможные варианты сведены в таблицу, где только в четырех случаях из восьми вмешательство в процесс осуществляется на правильном уровне. В остальных случаях — вмешиваются не те, кому надо, в результате чего ситуация, скорее всего, ухудшится.

С практической точки зрения ситуацию можно свести к диагностике стабильности и воспроизводимости процессов [4]. С системной точки зрения эта ситуация может быть описана через определенные системные архетипы [2, 6]. Чтобы применять системный подход на уровне процессов, учитывая вариабельность процессов, предлагается ввести четыре новых системных архетипа, относящихся к процессам, и учитывающих теорию вариабельности: "Излишняя регулировка", "Неправильная цель вмешательства", "Неправильный уровень вмешательства" и "Неправильная последовательность вмешательства".

Рассмотрим подробнее пример серийного изготовления метизных изделий, используемых в сборочном производстве. Если возникает несоответствующая единица продукции, оператор останавливает оборудование и ждет решения мастера. Постоянное вмешательство в процесс среднего управленческого звена приводит к потерям времени и средств на утилизацию несоответствующей продукции. Причина проблемы заключается в износе штампа. Если бы осу-

Возможные варианты вмешательства в процесс на различных уровнях организации

Состояние процесса	Вмешательство со стороны	
	линейного персонала	высшего руководства
Стабилен и воспроизводим	Не требуется	Не требуется
Стабилен, но невоспроизводим	Не требуется	Требуется
Нестабилен, но воспроизводим	Требуется	Не требуется
Нестабилен и невоспроизводим	Требуется	Требуется после достижения стабильности

ществлялся оперативный контроль качества [9] и оценка точности функционирования измерительных систем технологического оборудования [10], и плюс к этому велась контрольная карта Шухарта (ККШ), то картинка примерно соответствовала той, что показана на рис. 2. Из нее видно, что имеет место регулярный тренд — износ инструмента. Кроме того, смена штампа регулярно запаздывает, т.е. происходит после того, как некоторое количество единиц несоответствующих метизных изделий уже выпущено.

В отличие от обычного реагирования, которое явно запаздывает, применение полного системного подхода, включающего и моделирование собственно технологического процесса [11], и статистическое мышление в виде ККШ, может позволить не только уменьшить это запаздывание, но и осуществить реальное предупреждающее воздействие. Имея на рабочем месте ККШ, и, что важнее, осуществляя оперативный контроль качества [9] процесса изготовления метизных изделий, оператор может учесть появившуюся тенденцию до начала выпуска несоответствующей продукции, и заранее заказать замену инструмента (например, в точках 3, 4, 5 или 19—22). В этом случае система управления качеством улучшилась, качество изделий, используемых

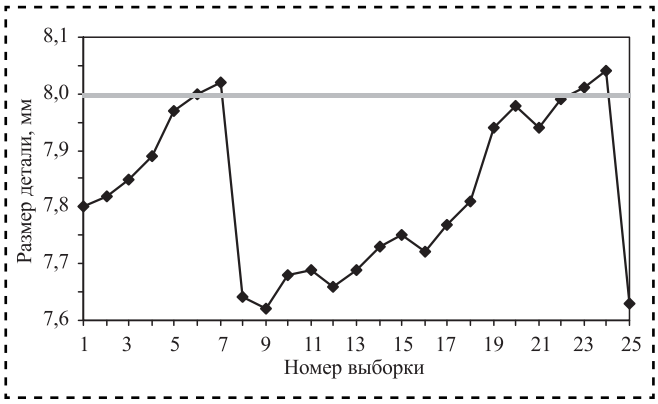


Рис. 2. Контрольная карта Шухарта "Размер деталей"

в сборочном производстве, выросло, а издержки уменьшились.

Если использование инструментов системного и статистического мышления недостаточно, то целесообразно разрабатывать вероятностную модель принятия управленческих решений в целях непрерывного улучшения процессов организации и как следствие ее системы менеджмента качества.

Рассмотрим неправильные решения, возникающие вследствие необоснованного вмешательства в процесс серийного изготовления метизных изделий. Оценим количественно вероятности принятия неоптимальных решений для каждого из вариантов неправильных решений, перечисленных в таблице. Примем следующие допущения. Ограничимся рассмотрением двустороннего и симметричного допуска:

$$\Delta = \text{ВГД} - \text{НГД},$$

где ВГД и НГД — верхняя и нижняя границы допуска соответственно.

Середину допуска обозначим буквой T (от английского target — цель). Условимся, что решение о вмешательстве принимается в соответствии с правилом светофора, предложенным Д. Шайниным [12, 13]. Возможен и иной выбор правила принятия решения, что отразится только на численных значениях, и не изменит ход самого анализа (рис. 3 на стр. 3 обложки), следует разделить пополам расстояние от центра до каждой из границ допуска, и тогда центральная область шириной $\Delta/2$ будет зоной зеленого света — все хорошо, две области, по $\Delta/4$ каждая, будут областями желтого света — предупреждение и вмешательство, и зоны за пределами границ допуска будут зонами красного света — идет брак, следует остановить производство.

Таким образом, считаем, что вмешательство в процесс осуществляется каждый раз, когда текущее значение процесса попадает в желтую или тем более в красную зону. При этом ответствен-

ное лицо не смотрит на контрольную карту Шухарта, поскольку не использует ни статистическое, ни системное мышление. Говоря образно, допуск и значение T — это голос потребителя, а центральная линия (ЦЛ) ККШ и расстояние от НКП до ВКП — это голос процесса/системы. Суть проблемы — это вопрос о том, насколько вмешательство в процесс учитывает, как соотносятся между собой голос процесса и голос потребителя. Границы на всех ККШ рассчитываются по правилу $\pm 3\sigma$ [14], где σ — стандартное отклонение, ВКП — НКП = 6σ; δ — расстояние между целевым значением T и ЦЛ (см. рис. 3).

В мировой практике установился подход, согласно которому требования к соотношению между голосом процесса и голосом потребителя выражаются через так называемые индексы воспроизводимости процессов (ИВП) $C_р$ и $C_{рк}$ [15]. Как известно, $C_р$ вычисляется через отношение ширины поля допуска к шести стандартным отклонениям.

На рис. 4 на стр. 3 обложки приведены границы интегрирования для четырех возможных архетипов при оценке вероятности неправильного принятия решений.

Вариант 1. Процесс стабилен и воспроизводим системный архетип "Излишняя регулировка". Так как процесс стабилен и воспроизводим, то $\Delta \geqslant 6\sigma$, т.е. $C_р \geqslant 1$. Точкой отсчета в расчетах всегда будет положение ЦЛ. Как правило, $C_{рк}$ меньше, чем $C_р$. Случай равенства этих двух показателей означает, что процесс центрирован точно на середину поля допуска, т.е. $\delta = 0$. Больше, чем $C_р$, индекс $C_{рк}$ быть не может [4]. При указанных выше допущениях вероятность вмешательства в процесс в некоторый момент времени будет равна вероятности попадания точки в интервалы, находящиеся между значениями -3σ и нижней границей зеленой зоны и между верхней границей зеленой зоны и значением 3σ. Интересующая нас вероятность оказывается функцией двух параметров: $C_р$ и $C_{рк}$. Обозначим $C_{рк}/C_р = q$.

Для количественной оценки того, насколько часто будут приниматься неправильные решения, или, каковы вероятности принятия неправильных решений для каждого из системных архетипов, на рис. 5 на стр. 3 обложки показан ход теоретических кривых вероятности принятия ошибочного решения о вмешательстве в процесс в зависимости от значений $C_р$ и $C_{рк}$. Обрыв левых границ расчетных кривых связан с тем, что индекс $C_{рк}$ должен быть больше 1. С ростом воспроизводимости процесса вероятность принятия ошибочных решений падает. При росте значения индекса воспроизводимости до двух она падает до нуля при нулевом смещении ($q = 1$). Если смещение будет равно нулю, а $C_р = 2$, то зеленая зона полностью совпадет с естественными границами процесса (ВКП и НКП), т.е. ошибочных решений не будет (по крайней мере в рамках этой модели). Из рис. 5 также видно, что при значении $C_р = 1$ и нулевом смещении вероятность ошибочных решений равна примерно 13 %, а при относительно больших значениях $C_р$ и больших смещениях эта вероятность может достигать примерно 18 % (точное значение — 18,3 %). В последнем случае примерно каждое пятое решение будет излишней регулировкой (почти каждое пятое решение о вмешательстве в процесс будет только лишь ухудшать его!) — процесс стабилен и воспроизводим и вмешиваться в него не надо.

Вариант 2. Процесс стабилен, но невоспроизводим — архетип "Неправильная цель вмешательства". Математически этот случай отличается от предыдущего тем, что и $C_р$ и $C_{рк}$ могут быть меньше единицы. Если $C_р < 1$, то поле допуска уже естественных границ процесса, или, что то же самое, точки процесса выходят за границы допуска. Если $C_р > 1$, а $C_{рк} < 1$, то это означает: настройка процесса изменилась настолько, что одна из границ поля допуска лежит внутри естественных границ процесса. Сами интегралы для этого случая останутся такими же, другими будут лишь области изменения параметров $C_р$ и $C_{рк}$ и области интегрирования (рис. 6 на стр. 3 обложки).

Кривые на рис. 6 в левой части — это продолжение кривых, представленных на рис. 5, в ту область значений параметров, которая в предыдущем случае была невозможна. У нас теперь появились значения $C_р$ и $C_{рк}$, меньшие 1. Анализ этой части кривых показывает, что вероятность ошибочных решений быстро возрастает, и при любых смещениях приближается к значению 50 %, поэтому примерно каждое второе решение будет неверным вмешательством в процесс.

Вариант 3. Процесс нестабилен, но воспроизводим — архетип "Неправильный уровень вмешательства". Математически этот случай отличается от предыдущих тем, что интегрируют не от НКП, а от НГД (рис. 7 на стр. 3 обложки).

По условию воспроизводимости $C_р > 1$, однако на $C_{рк}$ никаких ограничений не накладывается.

Ход кривых в целом такой же, но вероятность ошибок больше, чем в первом случае, и меньше, чем во втором. Если процесс нестабилен, то ничего считать невозможно, поскольку по определению нестабильный процесс — непредсказуем, и ему нельзя приписать не только определенного

значения σ, но и вид закона распределения неясен. Тем не менее проведенные теоретические расчеты имеют определенную ценность, поскольку позволяют понять последствия неприменения статистического мышления.

Рост воспроизводимости процессов во всех случаях ведет к снижению вероятности ошибочных решений. В то же время в отличие от оценок уровня дефектности даже $C_p = 2$ не избавляет от весьма высоких значений вероятности ошибочных решений (порядка 11 %). При всех ограничениях выполненных выше расчетов, связанных и с моделью принятия решений, и с видом принятого закона распределения, можно предположить, что общая тенденция этой зависимости останется неизменной.

Вариант 4. Процесс нестабилен и невоспроизводим — архетип "Неправильная последовательность вмешательства". В данном случае очень сложно применить математические расчеты, так как нельзя определить ни границы процесса, ни предположить соотношение между границами процесса и требованиями системы. Кроме того, и так большое количество допущений, предпринятых в данной модели, снижает достоверность расчетов для данного архетипа: результаты будут не лучше, чем в предыдущем случае. Таким образом, риски ошибочных решений столь велики, что пренебрегать ими не следует.

Заключение

Выявлено, что неумение применять математическое моделирование технологических процессов [11] и методы системного и статистического анализа к принятию решений относительно вмешательства в технологические процессы существенно снижает результативность управления качеством изделий, используемых в сборочном производстве. Предложено в модели непрерывного улучшения процессов объединять методологии статистического и системного мышления с применением математического моделирования технологических процессов.

В рамках моделирования технологических процессов управления качеством изделий, используемых в сборочном производстве, проведены оценки значений вероятности принятия решений и действий, приводящих к браку. Показано, что если не применять ККШ, не использовать оперативный контроль качества [9] и оценку точности функционирования измерительных систем технологического оборудования [10], то вероятности ошибочных решений могут достигать 13 % в случаях, когда с процессом все в порядке, и 50 %, когда процесс оказывается невоспроизводимым.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р ИСО 9001—2015**. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
2. **Хунузиди Е.И., Нуждин Г.А.** Управление качеством на инструментальном предприятии // Справочник. Инженерный журнал. 2016. № 11. С. 40—44.
3. **ГОСТ Р ИСО 22514-1—2015**. Статистические методы. Управление процессами. Ч. 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.
4. **ГОСТ Р ИСО 22514-2—2015**. Статистические методы. Управление процессами. Ч. 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе модели его изменения во времени. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.
5. **Шпер В.Л.** Экономика России и статистическое мышление // Методы менеджмента качества. 2017. № 6. С. 1.
6. **Шпер В.Л.** Статистическое мышление как практический инструмент системного анализа // Методы менеджмента качества. 2006. № 6. С. 39.
7. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А., Ляпина Г.И.** Процессный подход к менеджменту качества: стратегическое планирование // Справочник. Инженерный журнал. 2005. № 6. С. 26—29.
8. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А., Ляпина Г.И.** Процессный подход к менеджменту качества: управление политикой и целями в области качества // Справочник. Инженерный журнал. 2005. № 7. С. 41—42.
9. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Оперативный контроль качества магнитных измерений // Контроль. Диагностика. 2005. № 1. С. 29—32.
10. **Благовещенский Д.И.** Разработка и совершенствование методов и средств оценки точности функционирования измерительных систем технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Тула: ТулГУ, 2009.
11. **Митин О.Н., Нуждин Г.А., Нгуен К.Х.** Моделирование операции обжима с утонением толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2014. Вып. 5. С. 57—65.
12. **Shainin D., Shainin P.** Better than Taguchi orthogonal tables // Quality and Reliability Engineering International, 1988. V. 4. P. 143—149.
13. **Шпер В.Л.** Вести из Интернета // Методы менеджмента качества. 2002. № 7. С. 52—54.
14. **Shewhart W.A.** Statistical method from the viewpoint of quality control // N.Y., Dover Publications, Inc., 1939 (Reprint 1986). 163 p.
15. **Роль** документации при создании эффективной системы менеджмента организации / Е.И. Хунузиди и др. // Стандарты и качество. 2004. № 6.

УДК 629.114.2-235

Ю.И. Крыхтин, В.И. Карлов, *канд-ты техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: au@vstu.ru

Разработка дисковых остановочных тормозов с металлокерамическими дисками в трансмиссиях гусеничных машин и математическая модель нагружения фрикционного материала*

Разработаны дисковые остановочные тормоза (ОТ) с новыми фрикционными материалами сухого трения на накладках тормозных дисков и способ изготовления накладок. Фрикционная накладка состоит из плоского металлического каркаса с покрытием и припеченной к нему порошковой прессовки, которую изготавливают методом раздельного прессования и спекания под давлением или методом динамического горячего прессования (ДГП). Предлагаемое техническое решение может быть использовано для повышения эксплуатационных свойств дисковых ОТ трансмиссий транспортных гусеничных машин.

Disc stopping brakes (SB) with new friction materials for dry friction pads driven discs and pads producing method are developed. Friction pad consist of a blank metal frame with a coating and a powder pressing baked that manufactured by separate pressing and pressure sintering method, and by dynamic hot pressing (DHP) method. The proposed solution can be used to improve the properties of the disk SB experimental transmissions transport tracked vehicles.

Ключевые слова: дисковый остановочный тормоз, накладка фрикционная, заготовка, каркас, прессование, спекание, давление, сухое трение, ДГП.

Keywords: disc stopping brakes, friction pad, blank, frame, pressing, sintering, pressure, dry friction, DHP.

При создании новых быстроходных транспортных гусеничных машин (ГМ) резко возрастают требования по обеспечению их надежности: увеличение максимальной и средней скоростей движения, улучшение поворотливости, повышение эффективности и надежности торможения, ресурса эксплуатации. В связи с этим актуально создание высокоэффективных тормозных устройств, функционирующих при максимальных линейных скоростях скольжения до 100 м/с и удельной работе трения до 10 МДж/м^2.

Практика конструирования и эксплуатации тормозных устройств показала, что более перспективны дисковые тормоза, которые по сравнению с колодочными позволяют получить:

— более высокую эффективность при одинаковых габаритных размерах;

— постоянство усиливающего эффекта тормоза независимо от степени износа накладок;

— деформацию корпуса в осевом направлении при торможении в повышенном температурном режиме (что более благоприятно);

— меньшее и равномерно распределенное давление на накладки.

В тормозах этого типа, размещающихся на внешней стороне обода колеса, легче обеспечить герметизацию. К числу положительных факторов следует отнести большее постоянство зазоров между накладками и корпусными деталями при нагреве тормозов, их уравновешенность из-за отсутствия сил как осевых, так и направленных перпендикулярно к оси тормоза. Теплота

* Материалы статьи подготовлены с использованием программного обеспечения КОМПАС 3D для геометрического моделирования фрикционных устройств и PTC Mathcad для расчетов по математической модели и обработки результатов экспериментов, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки "Новые кадры ОПК" 2014 г.

у дисковых тормозов отводится через оребрение, а также за счет массивности деталей посредством вентиляционных каналов.

Надежность работы контактных узлов, к которым относятся тормозные устройства, в значительной мере зависит от конструктивного выполнения фрикционных элементов, режимов нагружения и применяемых материалов [1]. В дисковых ОТ ГМ распространены работающие в условиях сухого трения пары: асбофрикционный материал по стали или чугуну, чугун по стали и др. Фрикционные материалы в виде кольцевых или секторных накладок прикрепляют к основе — металлическим дискам.

Традиционные пары трения не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям к надежности перспективных тяжело нагруженных тормозных узлов. Так, например, асбофрикционный материал в силу его низких физико-механических свойств не обеспечивает при работе по стальному и чугунному контртелу требуемую эффективность торможения и термостойкость и разрушается, что приводит к отказам в работе узла. При использовании чугуна в качестве фрикционного материала, работающего по стальному контртелу, на поверхности первого наблюдается образование трещин, прижогов, наволакиваний, повышенный износ. Такая пара трения не позволяет получить достаточную надежость и заданный ресурс эксплуатации.

Один из путей повышения надежности и долговечности работы ОТ — применение металлокерамических материалов — спеченных порошковых фрикционных материалов на железной основе для сухого трения при изготовлении фрикционных дисков, работающих со стальными контртелами при высоких температурах на фрикционном контакте. Эти материалы обладают большой прочностью, твердостью, выдерживают большие нагрузки и температуру (до 1200 °С) [2].

Известны конструкции заготовок плоских фрикционных накладок сухого трения, состоящих из металлического каркаса с покрытием и припеченной к нему порошковой прессовки на железной основе, которые используются во фрикционных узлах трансмиссий транспортных машин. Способ изготовления таких заготовок накладок — раздельное прессование и спекание под давлением включает приготовление шихты, прессование накладки под давлением, сборку накладки с каркасом и спекание под давлением. Детали, полученные таким способом, имеют относительно высокую пористость, малую прочность, низкое качество припекания порошковой прессовки к каркасу, т.е. недостаточное сцепление каркаса с прессовкой. Для повышения надежности и долговечности порошковых изделий фрикционного назначения порошковую прессовку длительно припекают к стальному каркасу под большим давлением, что значительно усложняет технологический процесс изготовления заготовок, увеличивает брак изделий, требует применения специального термического оборудования для стабильного высокотемпературного спекания, снижает производительность процесса изготовления накладки [3—5].

Цель работы — определение работоспособности ОТ с новыми спеченными порошковыми фрикционными материалами на железной основе для сухого трения на накладках ведущих дисков трения и серийными стальными контртелами, износа фрикционных пар, надежности и долговечности ОТ.

Работу проводили совместно с Волгоградским тракторным заводом (ВГТЗ) и Институтом проблем материаловедения АН Украины.

Для оценки надежности сцепления порошковой прессовки с каркасом (подложкой) разработана математическая модель нагружения фрикционного материала ведущего диска ОТ трансмиссии транспортной ГМ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства:

$$\frac{0,5GR_{\text{вк}}}{i_{\text{бп}}} = \mu PR_{\text{ср}}z < \left[\tau_{\text{кр}}\right]0,2D_{\text{н}}^{3}\left(1-\frac{D_{\text{в}}^{4}}{D_{\text{н}}^{4}}\right),$$

где G — вес ГМ;

$R_{\text{вк}}$ — радиус ведущего колеса;

$i_{\text{бп}}$ — передаточное число бортовой передачи;

μ — коэффициент трения;

P — нормальная сила;

$R_{\text{ср}}$ — средний радиус трения;

z — число пар трения;

$[\tau_{\text{кр}}]$ — допускаемые напряжения на кручение в сопряжении "фрикционный материал — стальная основа", определяемые расчетом по математической модели нагружения фрикционного диска;

$D_{\text{н}}$ — наружный диаметр плоскости трения на диске;

$D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр плоскости трения на диске.

С помощью математической модели вычисляют напряжения $\tau_{\text{кр}}$ при кручении сопряжения "фрикционный материал — стальная основа", результаты сравнивают с результатами экспериментальных испытаний и корректируют [6, 7].

Разработаны и испытаны малогабаритные дисковые ОТ закрытого типа, предназначенные для установки в трансмиссиях транспортных ГМ. Тормоза оснащены полуромбовым рычажным приводом, шариковым механизмом включения (типа "слезки") с двухсторонним сервированием и гидравлическим усилением в приводе управления, металлокерамическими накладками сухого трения и применяются в пятискоростной гидромеханической трансмиссии с комбинированным механизмом поворота машины с удельной мощностью свыше 30 л. с./т (рис. 1, 2).

Тормоза имеют по 12 секторных накладок на одной поверхности трения, прикрепленных к основе в трех точках. Коэффициент взаимного перекрытия пары трения (соотношение площадей трения поверхностей нажимного и фрикционного дисков) равен 0,84.

В тормозных дисках использовали спеченные под давлением порошковые фрикционные материалы на железной основе СМК-80, СМК-105, СМК-137, СМК-137П и СМК-249П, разработанные и изготовленные Институтом проблем материаловедения АН Украины совместно с ВГТЗ. Сплошными контртелами при испытаниях служили: нажимной диск из стали 45Х (ГОСТ 4543—71, 262...311 НВ), а также корпус и крышка из стали 35Л-III (ГОСТ 977—75, 179...269 НВ).

Наружный диаметр плоскости трения в ОТ равен 331 мм, внутренний — 235 мм. Отношение ширины накладки к среднему радиусу трущейся поверхности 0,37.

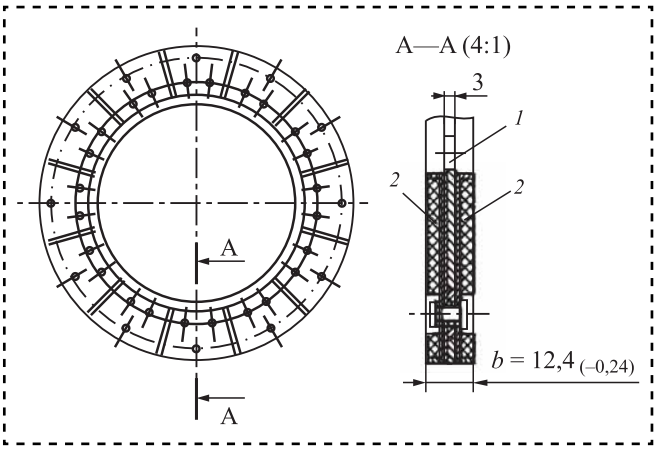


Рис. 2. Диск трения:
1 — основа; *2* — фрикционная накладка, изготовленная из порошкового материала

Таблица 1

Физико-механические свойства испытуемых фрикционных материалов

Фрикционный материал	Твердость, МПа	Пористость, %	Плотность, г/см^3
СМК-80	760...900	8...10	5,9
СМК-137	350...500	15	5,7
СМК-137П	200...300	20...25	5,2

Примечание. Адгезионная прочность фрикционных материалов более 22 МПа.

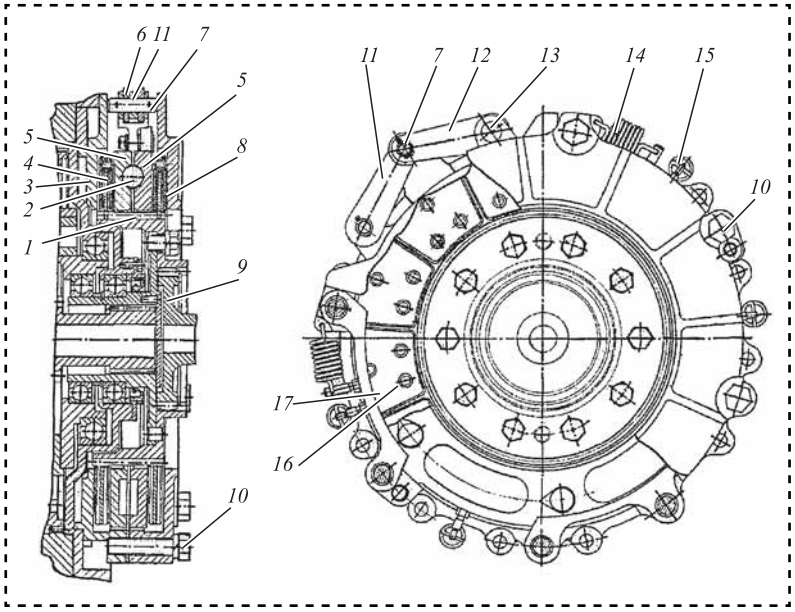


Рис. 1. Дисковый остановочный тормоз:
1 — барабан ведущий; *2* — шарик; *3* — корпус; *4* — диск трения; *5* — диск нажимной; *6* — ролик; *7* — ось; *8* — крышка; *9* — вал ведущий; *10* — болт; *11* — серьга; *12* — вилка; *13* — ось; *14, 15* — пружина; *16* — заклепка; *17* — накладка

Для изготовления накладок использовали стальные чашечные каркасы толщиной 2 мм с покрытием Н18М. Накладки, шлифованные с рабочей и привалочной сторон, имеют плавающее крепление к несущим дискам через специальное заклепочное соединение. Радиальное и окружное перемещение накладки относительно диска 1 мм, осевое — 0,4 мм, что позволяет компенсировать его коробление (табл. 1).

Математическая модель ОТ трансмиссии легкой ГМ

Требуемые тормозные моменты:

$$M'_{\text{т}} = \frac{P'_{\text{т}} R'_{\text{вк}}}{i_{\text{бп}}};\ M''_{\text{т}} = \frac{G \sin\alpha R_{\text{вк}} \eta_{\text{г}} \eta_{\text{бп}}}{2 i_{\text{бп}}};$$

$$M'''_{\text{т}} = \frac{G \varphi R_{\text{вк}}}{2 i_{\text{бп}}},$$

где $M'_т$, $M''_т$, $M'''_т$ — тормозные моменты при повороте машины на горизонтальном участке пути, при удержании машины на спуске, при торможении машины с максимальной скоростью соответственно;

$P'_т$ — сила тяги на отстающей гусенице:

$$P'_т = \left(f_с - \frac{\mu_{пов} L}{2B}\right)\frac{G}{2};$$

$\mu_{пов}$ — коэффициент сопротивления повороту;

L — база машины;

B — колея машины;

$i_{бп}$ — передаточное число бортовой передачи;

α — угол подъема (спуска);

φ — коэффициент сцепления ГМ с грунтом;

$\eta_г$, $\eta_{бп}$ — КПД гусеницы и бортовой передачи соответственно.

Удельное давление на дисках трения:

$$q' = \frac{P'}{F_1},$$

где P' — сила сжатия дисков трения; $P' = \dfrac{M'_т}{\mu_v i R_{ср}}$;

μ_v — скоростной коэффициент трения;

i — число пар поверхностей трения;

$R_{ср}$ — средний радиус поверхностей трения;

F_1 — площадь поверхности трения, $F_1 = \pi\left(R_н^2 - R_в^2\right)$;

$R_н$, $R_в$ — наружный и внутренний радиусы трения соответственно.

Максимальная скорость скольжения трущихся поверхностей:

$$v_{ск\,max} = \frac{\pi R_н n_{дв\,max}}{30 i_{гп} i_{цV}},$$

где $i_{гп}$, $i_{цV}$ — передаточные числа конической пары и цилиндрической пары на пятой передаче КП.

Работа трения тормоза

$$A = \left(1,2 + 0,002 i_{тр}^2\right)\frac{G}{g}\frac{v_{max}^2}{4},$$

где $i_{тр}$ — передаточное число трансмиссии на высшей передаче КП;

v_{max} — максимальная скорость движения ГМ, $v_{max} = \dfrac{0,377 R_{вк} n_{дв}}{i_{мппV} i_{бп}}$;

$i_{мппV}$ — передаточное число механизма передач и поворота на пятой передаче.

Удельная работа трения тормоза: $A_{уд} = A/2F_1$.

Средняя температура нагрева по толщине стальных дисков:

$$\Delta T = \frac{0,5\gamma' Q}{G_1 c_1 i},$$

где G_1 — вес одного стального диска;

i — число пар поверхностей трения;

$$\gamma' = \left(\lambda_1\gamma_1 c_1\right)^{0,5} c;$$

$$c = \left(\lambda_1\gamma_1 c_1\right)^{0,5}\left[\left(\lambda_1\gamma_1 c_1\right)^{0,5} + \left(\lambda_2\gamma_2 c_2\right)^{0,5}\right]^{-1};$$

λ_1 — коэффициент теплопроводности металла;

λ_2 — коэффициент теплопроводности фрикционного материала;

γ_1 — удельный вес металла;

γ_2 — удельный вес фрикционного материала;

c_1 — теплоемкость металла;

c_2 — теплоемкость фрикционного материала.

Средняя по толщине фрикционной обшивки температура нагрева:

$$\Delta T_{об} = \frac{0,5(1-\gamma_1)Q}{F_1\delta_2 c_2\gamma_2 i},$$

где δ_2 — толщина фрикционной обшивки;

Q — количество тепла, выделяющегося за время торможения машины: $Q = \dfrac{A}{E}$;

E — механический эквивалент теплоты.

Условия работы ОТ (расчетные значения)

Кинетическая энергия машины при максимальной скорости, поглощаемая двумя ОТ, МДж	3,01
Удельная работа трения при одном полном включении тормоза, Дж/см^2	816
Время буксования при включении, с	4,9...8,0
Число полных включений тормоза за ресурс	3200
Максимальная линейная скорость скольжения фрикционной накладки относительно контртела, м/с	60
Максимальное давление на диски трения, МПа	0,416
Температура в зоне трения, °С:	
средняя продолжительная	400...500
допустимая максимальная (кратковременно)	1000
рабочая	60...1000

Эксплуатационные испытания на транспортных ГМ опытных дисковых остановочных тормозов с накладками из материала СМК на дисках трения и стальными контртелами подтвердили высокую эффективность, надежность и значительное увеличение долговечности узла

Таблица 2

Результаты эксплуатационных испытаний дисковых ОТ

Пробег изделия, км	Фрикционный материал	Износ *h*, мм, для тормоза				Коробление *a*, мм, для тормоза			
		левого	правого	левого	правого	левого	правого	левого	правого
		Н	В	В	Н	Н	В	В	Н
5516	СМК-80	0,09/0,18	0,12/0,06	—/—	—/—	—/0,5...0,7	—/0,2...0,35	—/—	—/—
8500	СМК-137	0,055/0,44	0,12/0,35	0,12/0,42	0,055/0,35	—/0,35...1,05	—/0,35...1,05	—/0,3...1	—/0,3...1
8556	СМК-137П	0,46/0,74	0,35/0,69	0,345/0,56	0,375/0,62	0,4/0,4	0,35/0,45	0,3/0,2	0,3/0,4

Примечание. В числителе приведены данные для фрикционных дисков, в знаменателе — для контртел; Н, В — соответственно для наружной и внутренней поверхностей.

в трудных условиях движения при частых изменениях температуры (табл. 2).

По результатам испытаний ГМ для фрикционных материалов типа СМК накладок ведущих дисков ОТ можно рекомендовать адгезионную прочность $[\tau_{кр}] \geqslant 22$ МПа.

Для повышения надежности сцепления прессовки с каркасом, плотности и механической прочности, технологичности заготовки накладки и упрощения термического оборудования для ее изготовления (что упрощает организацию серийного производства фрикционных накладок), повышения надежности и долговечности работы узлов трансмиссий легких ГМ предложен новый высокопроизводительный способ изготовления накладок из порошкового материала.

В заготовку накладки введен напыленный подслой (между покрытием каркаса и порошковой прессовкой) из карбонильного железа или никеля. Накладку изготавливают следующими технологическими приемами:

а) прессованием под давлением 450...500 МПа порошковой шихты на каркас через покрытие и подслой;

б) предварительным припеканием порошковой прессовки к каркасу при температуре спекания 900...950 °С фрикционного слоя с изотермической выдержкой в защитной атмосфере эндогаза в течение 1—2 ч в проходной термической печи без давления с последующим охлаждением;

в) быстротечным нагревом предварительно спеченной без давления заготовки (например, токами высокой частоты в индукторе закалочном до температуры 1000...1100 °С);

г) динамическим горячим прессованием (ДГП) в штампе при давлении 500...700 МПа нагретой накладки с дальнейшим ее охлаждением на воздухе.

Новые заготовки фрикционных накладок с материалом на железной основе типа ФМК-79 ДГП для сухого трения, изготовленные методом ДГП через подслой из карбонильного железа, по сравнению с накладками, изготовленными по способу — раздельное прессование и спекание под давлением, имеют прочность соединения фрикционного слоя со стальной основой в 2...2,5 раза и твердость фрикционного слоя в 1,1...1,5 раза выше. Производительность изготовления накладки увеличивается в 1,5...3 раза, повышаются механическая прочность и технологичность деталей и упрощается термическое оборудование для стабильного высокотемпературного спекания, так как вместо малопроизводительных вертикальных садковых термических печей, не обеспечивающих стабильности высокотемпературного спекания под давлением, применяют высокопроизводительные проходные горизонтальные печи для спекания без давления, обеспечивающие стабильные характеристики предварительного спекания.

Физико-механические свойства фрикционных материалов порошковых накладок, изготовленных по технологии ДГП, представлены в табл. 3.

Материал ФМК-79 ДГП прошел успешно эксплуатационные испытания на фрикционных накладках дисковых ОТ ГМ с большой удельной мощностью и массой 13...18 т. Результаты эксплуатационных испытаний ГМ массой 13,2 т по определению износостойкости дисков трения ОТ с порошковым материалом ФМК-79 ДГП на накладках представлены в табл. 4.

Подтверждена допустимая адгезионная прочность $[\tau_{кр}] \geqslant 22$ МПа сцепления порошкового материала с каркасом накладки ведущего диска ОТ, которая заложена при создании фрикционного узла. Материал ФМК-79 ДГП может быть использован как унифицированный материал для фрикционных узлов механической трансмиссии ГМ — главный фрикцион, бортовой

Таблица 3

Физико-механические свойства фрикционных материалов порошковых накладок, изготовленных по технологии ДГП (температура спекания 1150 °С)

Фрикционный материал	Массовая доля элементов, %	Толщина заготовки, мм	Твердость, МПа (шкала HRF)	Пористость, %	Плотность, г/см^3
ФМК-79 ДГП	C 6; S 0,7; Cu 10; B 1,6; Si 3,0; Fe — остальное	5,9...6,3	830...1055	5...8	5,2...5,6
МКВ-50А ДГП	C 9,5...9,8; S 1,0...1,2; Cu 9,8...9,9; B 3,5...3,7; Si 3,5...3,7; асбест 3,1...3,3; Fe — остальное	5,27...5,5	600...800	5...8	5,0...5,1
СМК-137П ТУ 356-5—88 (получен раздельным прессованием и спеканием под давлением при температуре 1000...1100 °С в ИМП АН Украины)	C 11...13; ферромарганец 6...8; Cu 20...22; концентрат Mo 2...4; электрокорунд 3...5; Fe 42...44; мочевина 9...11	5,5...6,0	200...300 (HB)	20...25	5,2

Таблица 4

Результаты эксплуатационных испытаний ГМ массой 13,2 т по определению износостойкости дисков трения ОТ с порошковым материалом ФМК-79 ДГП на накладках

Пробег изделия, км	Материал фрикционных накладок	Среднее значение максимального одностороннего износа *h* поверхности трения фрикционного диска, мм			
		Левый ОТ		Правый ОТ	
		Диск I	Диск II	Диск I	Диск II
8000	ФМК -79 ДГП	0,30	0,32	0,34	0,33
8500	СМК-137	0,55	0,42	0,42	0,55
8550	СМК-137П	0,46	0,35	0,345	0,375

фрикцион, ленточный остановочный тормоз, дисковый остановочный тормоз.

Выводы

Предлагаемое техническое решение повышает эксплуатационные свойства ОТ трансмиссии за счет новых фрикционных материалов сухого трения на накладках ведомых дисков и метода их изготовления. Новый высокопроизводительный метод изготовления порошковых накладок ДГП повышает надежность сцепления прессовки с каркасом, плотность и механическую прочность, технологичность заготовки фрикционной накладки и упрощает термическое оборудование для ее изготовления, повышает надежность и долговечность работы узлов трансмиссий ГМ с большой удельной мощностью.

Библиографический список

1. **Труханов В.М., Зубков В.Ф., Крыхтин Ю.И., Желтобрюхов В.Ф.** Трансмиссии гусеничных и колесных машин. М.: Машиностроение, 2001. 736 с.

2. **Федорченко И.М., Крячек В.М. Панаиоти И.И.** Современные фрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1975. 334 с.

3. **Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Зозуля В.Д., Браун Э.Д.** Словарь справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.

4. **Панаиоти И.И., Иванова И.И., Карпец М.В.** Кинетика трибосинтеза структур в зоне фрикционного контакта материалов фрикционной пары, работающей в условиях теплоимпульсного нагружения // Трение и смазка в машинах и механизмах. № 4. 2009. С. 40—43.

5. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Физические основы разработки заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 70—74.

6. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска трения ГМТ и исследование влияния параметров напыления на прочность его сцепления с основой // Известия ВолгГТУ. 2018. № 2. С. 15—19.

7. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ и проверка ее испытанием синхронизаторов на изделиях // Известия ВолгГТУ. 2018. № 2. С. 20—23.

УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев, *д-р техн. наук*
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: shishkarevm@mail.ru

Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты с раздельными узлами трения

Показано, что принцип формирования внутриструктурных связей адаптивной фрикционной муфты на основе дифференцированного силового замыкания узлов трения позволяет получить оптимальное изменение моментов сил трения в зависимости от колебаний значений коэффициента трения и повысить точность срабатывания муфты.

It is shown that the principle of formation of intrastructural connections of an adaptive friction clutch on the basis of a differentiated power closure of friction units allows to obtain an optimal change in the values of friction moments depending on the fluctuations of the friction coefficient and to improve the accuracy of the clutch operation.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, раздельные узлы трения, точность срабатывания, фрикционная группа, нагрузочная способность.

Keywords: adaptive friction clutch, separate friction units, accuracy of operation, friction group, load capacity.

В адаптивных фрикционных муфтах (АФМ), разработанных на основе муфты Н.Д. Вернера [1], используется один узел трения, фрикционные пары которого имеют одинаковые параметры (коэффициент трения, средний радиус поверхностей трения и контактное давление на поверхностях трения). Входной сигнал управляющего устройства (УУ) формируется за счет полного выходного сигнала узла трения (вращающего момента) или его части, поэтому величины выходного сигнала УУ и сигнала, подаваемого на вход узла трения, зависят от выходного сигнала последнего. Такая схема формирования управляющих сигналов не позволяет повысить точность срабатывания АФМ.

Принципиальные схемы АФМ второго поколения построены на основе двух узлов трения с комбинированной [2] или двойной отрицательной обратной связью [3]. В обоих случаях фрикционные пары замыкаются одним нажимным узлом, что не позволяет более широко дифференцировать выходные сигналы узлов трения. Вследствие этого в первом случае точность срабатывания АФМ не соответствует увеличенной массе муфты, связанной с усложнением ее конструкции [4], во втором — нагрузочная способность АФМ в ряде вариантов ее применения не соответствует предъявляемым к ней эксплуатационным требованиям.

Раздельное силовое замыкание узлов трения от отдельных нажимных узлов позволит варьировать в более широком диапазоне выходные сигналы узлов трения и обеспечить их оптимальное сочетание для достижения наилучших эксплуатационных характеристик АФМ.

Цель работы — разработка и исследование АФМ с раздельными узлами трения.

Указанный принцип нашел свое воплощение в структурно-функциональной схеме АФМ, показанной на рис. 1. Выходной сигнал $F_р(t)$ УУ

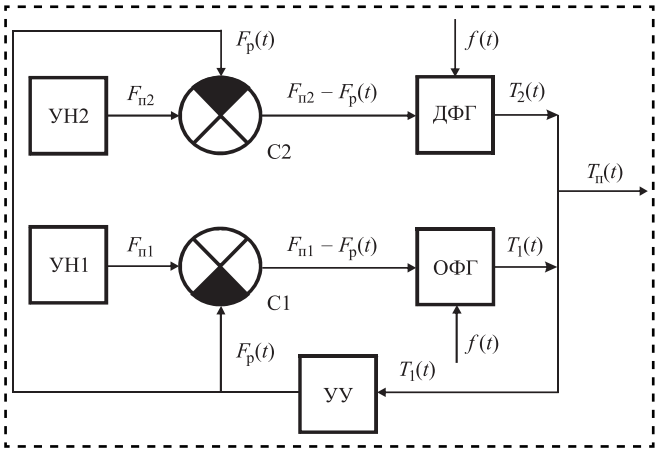


Рис. 1. Структурно-функциональная схема АФМ с раздельными узлами трения

подается на сумматоры С1 и С2. Он формируется только выходным сигналом $T_1(t)$ основной фрикционной группы (ОФГ). На входы сумматоров подаются также задающие воздействия $F_{п1}$ и $F_{п2}$ соответственно нажимных узлов УН1 и УН2.

На входы ОФГ и дополнительной фрикционной группы (ДФГ) поступают соответствующие трансформированные (по отношению к входам сумматоров) сигналы вида $F_{п1} - F_р(t)$ и $F_{п2} - F_р(t)$. Особенность схемы — формирование входного сигнала УУ за счет одной фрикционной группы, а входных сигналов фрикционных групп — за счет выходного сигнала УУ.

Принципиальная схема АФМ приведена на рис. 2. Полумуфты *1* и *2* связаны между собой с помощью ОФГ, состоящей из дисков трения *3* и *4*, и ДФГ, включающей диски трения *5* и *6*.

Диски *3* и *5* связаны с барабаном полумуфты *2* посредством шлицевого соединения, а диски *4* и *6* — аналогичным способом соответственно с нажимными дисками *7* и *8*.

Силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ осуществляется с помощью нажимных узлов (пружин *9* и *10*), а также элементов для регулирования сил их начального натяжения (на рис. 2 не показаны). Между пружиной *9* и упорным диском полумуфты *1* установлен подшипник *11* для уменьшения момента сил трения.

Нажимной диск *8* соединен с полумуфтой *1* при помощи направляющей шпонки *12*.

УУ состоит из тел качения (шариков) *13*, которые размещены в отверстиях ведущего диска *14*, закрепленного на полумуфте *1*. Тела качения *13* входят в скошенные гнезда, которые выполнены на торце нажимного диска *7*.

Пакет дисков трения ОФГ опирается на ведущий диск *14* посредством подшипника *15*.

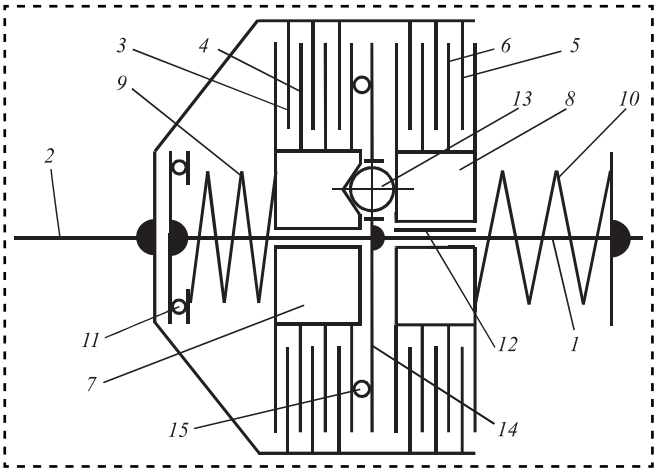


Рис. 2. Принципиальная схема АФМ с раздельными узлами трения

Для установления зависимости предельного вращающего момента АФМ от коэффициента трения будем исходить из следующего равенства:

$$T_п = T_1 + T_2, \tag{1}$$

где $T_п$ — предельный вращающий момент АФМ;

T_1, T_2 — предельные вращающие моменты соответственно ОФГ и ДФГ.

Для первого и второго слагаемых в равенстве (1) запишем:

$$T_1 = z_1 R_{ср} f\left(F_{п1} - F_р\right); \tag{2}$$

$$T_2 = z_2 R_{ср} f\left(F_{п2} - F_р\right), \tag{3}$$

где z_1 — число пар трения ОФГ;

$R_{ср}$ — средний радиус поверхностей трения пар ОФГ и ДФГ;

f — коэффициент трения между элементами пар трения ОФГ и ДФГ;

z_2 — число пар трения ДФГ.

В формуле (3) не учитывается сила трения в шпоночном соединении, поскольку для подобных соединений коэффициент трения в расчетах предохранительных муфт принимается постоянным [5], а сила трения не влияет на точность срабатывания АФМ и незначительно сказывается на величине момента сил трения ДФГ, увеличивая его.

Поскольку входной сигнал УУ $F_р$ (распорная сила на телах качения *13*) формируется за счет выходного сигнала T_1 ОФГ, запишем:

$$F_р = \frac{T_1}{r} \operatorname{tg} \alpha, \tag{4}$$

где α — угол скоса боковой стенки гнезда под тело качения *13*;

r — радиус окружности, на которой расположены тела качения *13*.

После подстановки соотношения (2) в формулу (4) получаем:

$$F_р = z_1 F_{п1} C \frac{f}{1 + z_1 C f}, \tag{5}$$

где C — коэффициент усиления (КУ) УУ обратной связи, $C = \frac{R_{ср}}{r} \operatorname{tg} \alpha$.

Подставляя правую часть соотношения (5) в формулы (2) и (3), находим:

$$T_1 = z_1 F_{п1} R_{ср} \frac{f}{1 + z_1 C f}; \tag{6}$$

$$T_2 = z_2 F_{п1} R_{ср} \frac{n + (n-1) z_1 C f}{1 + z_1 C f}, \tag{7}$$

где n — коэффициент, $n = F_{п2}/F_{п1}$.

Используя формулы (6) и (7) в равенстве (1), окончательно получим:

$$T_п = F_{п1}R_{ср}f\,\frac{z_1 + z_2n + (n-1)z_1z_2Cf}{1 + z_1Cf}. \quad (8)$$

Анализ соотношений (7) и (8) показывает, что вид кривой нагрузочной характеристики муфты $T_п(f)$ и ДФГ $T_2(f)$ зависит от коэффициента n:

при $n > 1$ функции (7) и (8) возрастающие (первые производные положительны при любых значениях f);

при $n < 1$ функция (7) имеет максимум при значении коэффициента трения, равном

$$f_{к1} = \frac{\sqrt{1/(1-n)} - 1}{z_1C},$$

и обращается в ноль при значении коэффициента трения

$$f_0 = \frac{n}{(1-n)z_1C}. \quad (9)$$

Функция (8) не обращается в ноль ни при каких значениях коэффициента трения f, поскольку не обращается в ноль при любых значениях f одна из ее составляющих — функция (6). Как и функция (7), функция (8) имеет максимум в точке

$$f_{к2} = \frac{\sqrt{(z_1 + z_2)/[z_2(1-n)]} - 1}{z_1C}. \quad (10)$$

Неравенство $n < 1$ не является единственным условием, влияющим на вид графика функции $T_п(f)$, который зависит, кроме того, от значения $f_{к2}$. Если $f_{к2} \geqslant f_{max}$, функция (8) возрастает в интервале изменения величины коэффициента трения $f_{min}...f_{max}$.

Для того чтобы существовал единственный экстремум функции (8) в интервале $f_{min}...f_{max}$, необходимо выполнение следующих условий:

$$f_0 > f_{max}; \quad (11)$$

$$f_0 > f_{к2}. \quad (12)$$

На основе соотношения (9) условие (11) можно привести к следующему виду:

$$n \geqslant \frac{z_1Cf_{max}}{1 + z_1Cf_{max}}, \quad (13)$$

а условие (12), с учетом соотношений (9) и (10), — к виду:

$$n_1 > \frac{z_1}{z_1 + z_2}. \quad (14)$$

Сравнение коэффициентов n и n_1 в форме неравенства $n > n_1$ с учетом соотношений (13) и (14) приводит к неравенству

$$z_2Cf_{max} > 1. \quad (15)$$

При выполнении неравенства (15) ограничение минимальной величины коэффициента n проводится в соответствии с соотношением (13); если неравенство (15) не выполняется — ограничение проводится с учетом соотношения (14).

Коэффициент точности АФМ при $n > 1$ определяют по формуле:

$$K_т = \frac{f_{max}\left[z_1 + z_2n + (n-1)z_1z_2Cf_{max}\right](1 + z_1Cf_{min})}{f_{min}\left[z_1 + z_2n + (n-1)z_1z_2Cf_{min}\right](1 + z_1Cf_{max})}. \quad (16)$$

При $n < 1$ коэффициент точности АФМ определяется как отношение вращающего момента $T_п$ при $f = f_{к2}$ к вращающему моменту T_{min}, если $T_{min} < T_{max}$ (где T_{min}, T_{max} — вращающие моменты АФМ при f_{min} и f_{max} соответственно), или к вращающему моменту T_{max}, если $T_{min} > T_{max}$. Возможен случай, когда при наличии максимума функции (8) внутри интервала $f_{min}...f_{max}$ предельные моменты одинаковы на границах этого интервала, т. е. $T_{min} = T_{max}$. Это возможно при значении КУ, равном

$$C_{кр} = \frac{\sqrt{(m+1)^2 + 4m(z_1 + z_2n)/[z_2(1-n)]} - (m+1)}{2z_1f_{max}}, \quad (17)$$

где m — относительная ширина интервала изменения коэффициента трения, $m = f_{max}/f_{min}$.

В данном случае коэффициент точности АФМ вычисляют по формуле

$$K_т = \frac{f_{к2}\left[z_1 + z_2n - (1-n)z_1z_2Cf_{к2}\right](1 + z_1Cf_{max})}{z_1f_{max}(1 + z_1Cf_{к2})} \quad (18)$$

при $f_0 = f_{max} \equiv T_2 = 0$.

Для существования экстремума функции (8) внутри интервала $f_{min}...f_{max}$ и равенства друг другу величин вращающих моментов T_{min} и T_{max} необходимо, чтобы выполнялись равенство (17) и условие $f_0 = f_{max}$. Этому требованию удовлетворяет равенство значений КУ, полученных из соотношения (17) и с учетом следующей формулы, вытекающей из этого равенства:

$$C = \frac{n}{(1-n)z_1f_{max}}. \quad (19)$$

Значение коэффициента n, соответствующее указанному равенству, можно найти на основе графического решения уравнений (17) и (19) или в аналитической форме:

$$n = \frac{z_1 m}{z_2 + z_1 m}.$$

Если $z_1 = z_2$, то последнее соотношение принимает вид

$$n = \frac{m}{1+m}.$$

Исследуем влияние КУ на точность срабатывания АФМ при наличии максимума функции (8) внутри интервала $f_{\min} \ldots f_{\max}$. Оценим возможность существования области значений КУ, в которой $K_т$ убывает. Этому условию соответствует неравенство $K'_т(C) < 0$.

Поскольку в соотношении (18) имеются два взаимосвязанных члена C и $f_{к2}$, преобразуем его на основе формулы (10). После подстановки $f_{к2}$ из формулы (10) в соотношение (18) имеем:

начат от значения, определяемого по соотношению (17). В случае уменьшения КУ наблюдается обратная картина.

Данный вывод позволяет установить способ определения коэффициента точности АФМ, один из членов формулы которого представляет собой минимальный предельный вращающий момент муфты.

Коэффициент точности определяем по следующей схеме:

при $C < C_{кр}$ (значение $C_{кр}$ находим по формуле (17)):

$$K_т = \frac{T_{f_{к2}}}{T_{\max}},$$

где $T_{fк2}$ — предельный вращающий момент муфты при $f_{к2}$;

при $C > C_{кр}$ (если C не превышает значения, вычисленного по формуле (19)):

$$K_т = \frac{T_{f_{к2}}}{T_{\min}}.$$

$$K_т = \left\{\sqrt{(z_1+z_2)/[z_2(1-n)]} - 1\right\}\left[z_1 + z_2 - \sqrt{z_2(1-n)(z_1+z_2)}\right](1 + z_1 C f_{\max}) \Big/ \left\{z_1^2 C f_{\max}\sqrt{(z_1+z_2)/[z_2(1-n)]}\right\}. \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что с увеличением КУ возрастает точность срабатывания АФМ.

Для определения тенденции и оценки скорости изменения значения предельного вращающего момента АФМ на границах интервала $f_{\min} \ldots f_{\max}$ при варьировании величины КУ и наличии максимума функции (8) внутри указанного интервала вычислим первую производную этой функции по переменной C:

$$D'(C) = -\frac{z_1 f^2 (z_1 + z_2)}{(1 + z_1 C f)^2}. \quad (21)$$

Производная (21) показывает, что величина вращающего момента $T_п$ уменьшается с увеличением КУ, в том числе и на границах интервала $f_{\min} \ldots f_{\max}$. Представляя соотношение (21) как соответствующую функцию, вычислим ее первую производную по переменной f:

$$D'(f) = -\frac{z_1 (z_1 + z_2)}{(1 + z_1 C f)^3}.$$

При увеличении коэффициента трения скорость уменьшения функции (21) и (8) более значительна, чем при уменьшении коэффициента трения. Поэтому при увеличении КУ уменьшается значение $f_{к2}$, если отсчет изменения КУ

Для сохранения максимума функции (8) при варьировании величины КУ в целях определения минимального значения $K_т$ следует установить границы варьирования. Учитывая, что для этого необходимо изучить динамику изменения КУ по соотношениям (17) и (19), удобнее воспользоваться графическим способом.

На рис. 3 показаны графики функций (17) и (19) (кривые *1* и *2* соответственно). Исходные данные: $m = 8$; $z_1 = 2$; $z_2 = 8$; $f_{\max} = 0{,}8$.

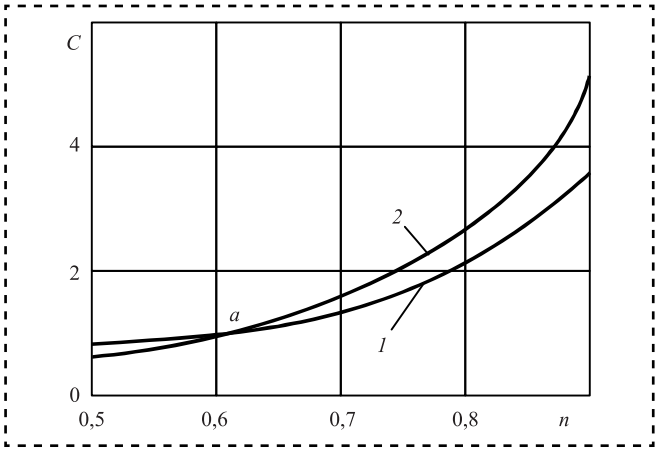


Рис. 3. Зависимость КУ от коэффициента *n*

Кривые *1* и *2* имеют общую точку *a*, соответствующую значению коэффициента *n*, вычисленному по приведенному выше соотношению.

Графики, изображенные на рис. 3, позволяют установить границы варьирования КУ АФМ на основе следующих рассуждений:

— область значений КУ, расположенная слева от точки *a* и заключенная между кривыми *1* и *2*, непригодна для выбора и варьирования внутри нее величины КУ, поскольку значения КУ, соответствующие обращению в ноль вращающего момента T_2 при f_{max}, меньше значений, удовлетворяющих условию существования максимума функции (8) внутри интервала $f_{min}...f_{max}$ при соблюдении равенства $T_{min} = T_{max}$. В данном случае при выборе величины КУ, принадлежащей кривой *1*, функция (7) обращается в ноль при условии $f_i < f_{max}$;

— область значений КУ, лежащая справа от точки *a* между кривыми *1* и *2*, может быть использована для варьирования (в сторону увеличения КУ) от значений, принадлежащих кривой *1*, до значений, соответствующих кривой *2* при фиксированном *n*. В данном случае при КУ, меньших, чем соответствующее значение, принадлежащее кривой *2*, величина вращающего момента T_2 не будет обращаться в ноль внутри интервала $f_{min}...f_{max}$, что позволяет использовать при определении $K_т$ значение T_{min} или T_{max};

— значения КУ, расположенные в области слева от точки *a* и ниже кривой *2*, а также в области, находящейся справа от точки *a* и ниже кривой *1*, могут быть использованы для варьирования, поскольку в этих случаях величина вращающего момента T_2 не обращается в ноль внутри интервала $f_{min}...f_{max}$.

Исследуем влияние параметров *C* и *n* на точность срабатывания АФМ. На рис. 4 приведены

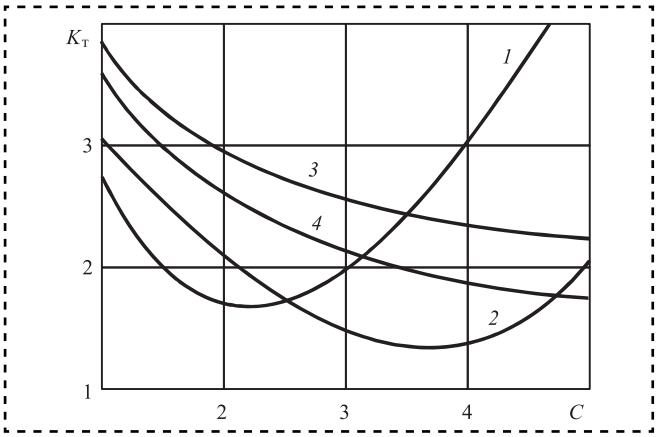


Рис. 4. Зависимость коэффициента точности АФМ от КУ

графики зависимости $K_т(C)$ при $n = 0{,}8$ (кривая *1*) и $n = 0{,}9$ (кривая *2*). Графики построены по тем же исходным данным, что и кривые на рис. 3.

Анализ графиков показывает:

— увеличение КУ до критического значения ($C = 2{,}12$ — для кривой *1*, $C = 3{,}81$ — для кривой *2*) повышает точность срабатывания АФМ (падающие участки кривых *1* и *2*). При увеличении КУ выше критического значения точность срабатывания муфты уменьшается. В первом случае (кривая *1*) это объясняется переходом КУ за значение, при котором вращающий момент T_2 обращается в ноль на верхней границе интервала $f_{min}...f_{max}$. Во втором случае (кривая *2*) увеличение КУ (при $C > C_{кр}$) приводит к резкому уменьшению величины вращающего момента T_2 при $f_i = f_{max}$ и, соответственно, к уменьшению величины вращающего момента $T_п$, что отрицательно сказывается на точности срабатывания муфты;

— увеличение коэффициента *n* при выполнении условия $z_2 > z_1$ приводит к росту точности срабатывания АФМ;

— муфта обладает наибольшей точностью срабатывания при $C_i = C_{кр}$;

— точность срабатывания АФМ повышается с увеличением $C_{кр}$ и *n*.

Характер влияния $C_{кр}$ на точность срабатывания АФМ и взаимное расположение на рис. 3 участков кривых *1* и *2*, соответствующих области значений коэффициента $n = 0{,}65...0{,}9$, позволяет определить способ повышения точности срабатывания муфты.

Обратимся к формуле (17). Для выбранного сочетания материалов пар трения АФМ параметры *m* и f_{max} фиксированные, поэтому кроме *n* на $C_{кр}$ влияют z_1 и z_2. Эти параметры входят также в соотношение (20), определяющее величину $K_т$.

Исследуем влияние параметров z_1 и z_2 на точность срабатывания АФМ, используя графический способ. Необходимое соотношение между z_1 и z_2 можно установить на основе ранее полученной формулы, определяющей значение коэффициента *n*, при котором величина КУ, приводящая к равенству $T_2(f_{max}) = 0$, равна $C_{кр}$:

$$z_1 = \frac{z_2 n}{(1-n)m}. \qquad (22)$$

При z_1, меньших, чем значения, полученные по соотношению (22), формула (20) по-прежнему справедлива.

На рис. 5 приведен график зависимости $K_т(z_2/z_1)$ (кривая *1*). Исходные данные: $z_2 = 8$; $n = 0{,}9$; $m = 8$; $f_{max} = 0{,}8$. Варьирование величины z_2/z_1 осуществляли за счет изменения параметра z_1

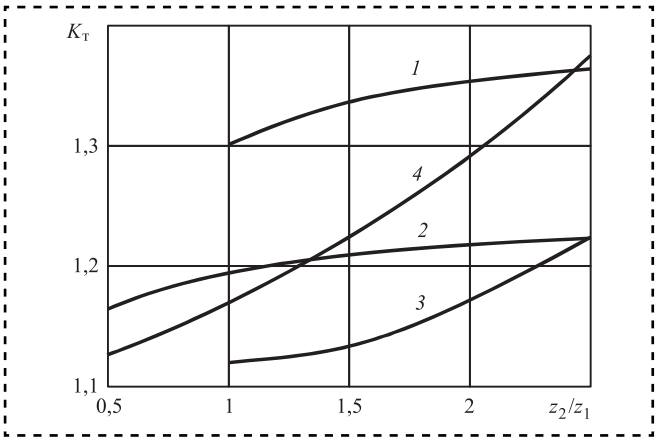


Рис. 5. Зависимость коэффициента точности АФМ от соотношения числа пар узлов трения

с учетом ограничения его величины в соответствии с формулой (22). Значения коэффициента точности вычисляли по формуле:

$$K_т = \left\{\sqrt{(z_1+z_2)/[z_2(1-n)]}-1\right\}\times$$
$$\times\left[z_1+z_2-\sqrt{z_2(1-n)(z_1+z_2)}\right](1+z_1Cf_{\max})\Big/\left\{\sqrt{(z_1+z_2)/[z_2(1-n)]}z_1Cf_{\max}\left[z_1+z_2n-(1-n)z_1z_2Cf_{\max}\right]\right\}$$

при $C = C_{кр}$ и $f_0 > f_{\max}$.

При $z_2/z_1 < 1$ коэффициент точности не вычисляли, поскольку в данном случае соотношение (22) не выполняется.

Для исследования влияния n на точность срабатывания АФМ построен соответствующий график (см. рис. 5, кривая *2*) при $n = 0{,}95$. В связи с этим появилась возможность уменьшения отношения z_2/z_1 до 0,5, получив неравенство $z_2 < z_1$. Одновременно это позволило увеличить $C_{кр}$ (см. рис. 5, кривые *3* и *4*, отражающие зависимость $C_{кр}(z_2/z_1)$ соответственно при $n = 0{,}9$ и $n = 0{,}95$).

Анализ графиков показывает следующее:

— точность срабатывания АФМ незначительно уменьшается с уменьшением числа пар трения ОФГ, несмотря на увеличение $C_{кр}$. Поскольку уменьшение z_1 непропорционально увеличению $C_{кр}$, снижение точности срабатывания АФМ объясняется уменьшением распорной силы, приходящейся на единицу изменения коэффициента трения;

— увеличение коэффициента n в области значений, близких к единице, позволяет соответственно увеличить параметр z_1 и, тем самым, повысить точность срабатывания АФМ.

Рассмотрим варианты АФМ с $n > 1$ и $n = 1$. При $n = 1$ имеем:

$$T_п = (z_1+z_2)F_{п1}R_{ср}\frac{f}{1+z_1Cf}. \qquad (23)$$

Исследуем влияние n на точность срабатывания АФМ при $n > 1$, воспользовавшись формулой (16). Первая производная функции (16) по переменной n без учета постоянных сомножителей, равна:

$$K'_т(n) = \frac{z_1z_2(z_1+z_2)C(f_{\max}-f_{\min})}{\left[z_1+z_2n+(n-1)z_1z_2Cf_{\min}\right]^2}.$$

Производная положительна, следовательно, для повышения точности срабатывания АФМ необходимо использовать минимальные (в пределах нижней границы) значения n.

С учетом замечания построены графики функции $K_т(C)$ при $n = 1{,}02$ и $n = 1$ (см. рис. 4, кривые *3* и *4*). Остальные исходные данные при построении графиков остались без изменений.

Кривая *3* на рис. 4 отражает функцию (16), кривая *4* построена на основании формулы (23).

Анализ графиков показывает следующее:

— точность срабатывания в обоих случаях повышается с увеличением КУ (см. рис. 4, кривые *3* и *4*);

— при $n = 1$ изменение величины КУ в большей, чем при $n > 1$, степени влияет на повышение точности срабатывания АФМ;

— точность срабатывания АФМ при $n = 1$ выше, чем при $n > 1$ (см. рис. 4, кривые *3* и *4*).

Исследуем нагрузочную способность муфты при $n = 1$, $n > 1$ и $n < 1$ и выявим на основе упомянутых характеристик наилучший вариант.

В качестве исходного условия при сравнении вариантов муфты примем одинаковое число пар трения, как в целом, так и в отдельности по фрикционным группам.

Отдельно стоит задача выбора КУ для вариантов АФМ с $n > 1$ и $n = 1$. Анализ формулы (8) показывает, что при указанных значениях n и одинаковых величинах КУ нагрузочная способность муфты выше, чем при $n < 1$. Используя концепцию надежной работы АФМ в интервале $f_{\min}...f_{\max}$ [6], зададим исходное условие равенства друг другу вращающих моментов АФМ для всех вариантов при $f_i = f_{\max}$ и сравним точность срабатывания вариантов.

В качестве исходных примем $F_{п1} = 600$ Н; $R_{ср} = 0{,}1$ м; $z_1 = 3$; $z_2 = 8$; $f_{\min} = 0{,}1$; $n_1 = 1{,}05$; $n_2 = 1$; $n_3 = 0{,}95$ (таблица).

При одинаковой нагрузочной способности наибольшую точность срабатывания имеет вариант АФМ с $n < 1$ при наименьшем значении КУ.

Результаты вычислений

Вариант	Параметры		
	$T_п$, Н·м	$K_т$	C
$n > 1$	26,2	2,07	5,45
$n = 1$		1,53	5,06
$n < 1$		1,23	4,36

Синтез показал, что АФМ с раздельными узлами трения при определенных сочетаниях параметров УУ может обладать лучшими, чем базовый вариант АФМ второго поколения, эксплуатационными характеристиками, в частности, нагрузочной способностью и точностью срабатывания. Впервые в практике проектирования АФМ всех типов получен результат, заключающийся в том, что наибольшая точность срабатывания муфты может быть достигнута при уменьшенном значении КУ.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании конструкции АФМ с раздельными узлами трения для выбора варианта с наилучшим сочетанием нагрузочной способности и точности срабатывания.

Выводы

1. Принцип формирования внутриструктурных связей АФМ, заключающийся в дифференцированном силовом замыкании узлов трения, позволил оптимально изменить величины моментов сил трения в зависимости от величины коэффициента трения и повысить точность срабатывания муфты.

2. Рациональным является вариант АФМ, в котором отрицательной обратной связью охвачены оба узла трения, а управляющее воздействие УУ формируется за счет выходного сигнала одного из узлов трения.

3. В зависимости от значения n нагрузочная характеристика АФМ в интервале изменения коэффициента трения принимает следующие формы:

— при $n \geqslant 1$ предельный вращающий момент АФМ возрастает;

— при $n < 1$ нагрузочная характеристика АФМ имеет, в зависимости от значений n и КУ, точку максимума или отражается возрастающей кривой.

4. При $n < 1$ и существовании точки максимума нагрузочной характеристики внутри указанного интервала при равенстве друг другу вращающих моментов на его границах АФМ обладает более высокой точностью срабатывания, которая увеличивается при $n \to 1$.

5. Точность срабатывания АФМ повышается при увеличении числа пар узла трения, выходной сигнал которого формируется с помощью управляющего воздействия УУ. Существует функциональная зависимость между коэффициентом n и отношением числа пар узлов трения, при которой достигается наибольшая точность срабатывания АФМ.

Библиографический список

1. **Шишкарев М.П.** Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 2. С. 42—44.

2. **Шишкарев М.П.** Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Вестник машиностроения. 2006. № 6. С. 7—10.

3. **Пат. 2036343 РФ, МПК^6 F 16 D 7/02.** Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарев. № 93029030/28; заявлено 14.05.93; опубл. 27.05.95. Бюл. № 15. 5 с.

4. **Шишкарев М.П.** Компоновочные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // Вестник машиностроения. 2003. № 7. С. 7—12.

5. **Шишкарев М.П.** Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт. Ростов н/Д.: Рост. гос. акад. с.-х. машиностроения, 2008. 148 с.

6. **Шишкарев М.П.** Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 5. С. 18—24.

УДК 539.21; 539.621

М.В. Ноженков, *д-р техн. наук (ЗАО "Техном-Т", Москва)*
E-mail: technomt@technom-t.ru

Постоянная тонкой структуры и вихревой рост кристаллов*

Проведены исследования влияния технологии получения на свойства покрытий, наносимых ионно-плазменными методами. Обнаружена зависимость вихревого движения частиц в процессе нанесения на кристаллическую структуру и свойства получаемого вещества. Установлена возможность создания конденсированной среды с вихревыми квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии по эквипотенциальным поверхностям среды в виде подобных явлений (сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме). Возникновение без диссипационного переноса частиц происходит в виде фазового перехода при критической величине характерного параметра (преодоление энергетического потенциального барьера). Предложена модель роста кристаллов при нанесении покрытий. Определены критерии, отвечающие за подобие исследованных физических явлений.

The technology of obtaining coatings applied by ion-plasma methods has been studied. The dependence of the vortex motion of particles in the deposition process on the crystal structure and properties of the obtained substance is found. The possibility of creating a condensed medium with vortex quantum flows of particles moving without scattering of energy along equipotential surfaces of the medium in the form of similar phenomena (super low friction, superconductivity, superfluidity, crystal growth in a vacuum) is established. The emergence without the dissipative transport of particles occurs as a phase transition at a critical value of the characteristic parameter (overcoming the energy potential barrier). A crystal growth model is proposed for the application of coatings. The criteria responsible for the similarity of the investigated physical phenomena are determined.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, вакуум, частица, атом, рост кристаллов, электронографические и электронно-микроскопические исследования, сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, потоки без диссипации энергии, броуновское движение, подобие, вихревое поле.

Keywords: ion-plasma coatings, vacuum, particle, atom, crystal growth, electron diffraction and electron microscopy, superlow friction, superconductivity, superfluidity, flows without energy dissipation, Brownian motion, similarity, vortex field.

Введение

Триботехнические свойства деталей и узлов машин и механизмов определяются структурой и физико-механическими характеристиками их рабочих поверхностей. Строение поверхностного слоя резко отличается от основного материала. Свойства поверхностей во многом определяются их кристаллической структурой, которая формируется в процессе получения. Перспективно получение вещества с анизотропной структурой в виде тонкослойных покрытий. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности получения необычных явлений в виде сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести [1—4]. Рядом преимуществ обладают вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий, основанные на ионном (катодном) распылении. Покрытия, наносимые катодным распылением, имеют высокую адгезию к подложке, сохраняют стехиометрию, равномерность распределения и однородность по толщине [4—22]. Такие покрытия — эффективное средство защиты рабочих поверхностей от изнашивания. В качестве защитных покрытий нашли применение соединения переходных металлов IV—VI групп Периодической системы (дихалькогениды, нитриды, карбиды, оксиды), наносимые вакуумными ионно-плазменными методами [5]. Легирование таких покрытий позволяет существенно улучшить необходимые свойства вещества и придать им новые качества. Разработка моделей роста покрытий на основе дихалькогенидов переходных металлов и взаимосвязь с технологией их нанесения, объяснение

* По материалам доклада на конференции "Трибология — машиностроению—2016".

процесса формирования покрытий с высокими триботехническими свойствами и механизма антифрикционных свойств, а также комплексные исследования кристаллической структуры и физико-механических свойств покрытий — актуальная научно-техническая задача. Возможностью реализации движения без диссипации объясняются явления роста кристаллов в вакууме, сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести (при определенных условиях и наличии термоэлектричества) [1—22]. Одна из фундаментальных физических постоянных, определяющая квантовые свойства вещества, — постоянная тонкой структуры (ПТС).

Цель работы — создание конденсированной среды с квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии в отсутствии сил взаимодействия по эквипотенциальным поверхностям среды в виде сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Покрытия на основе переходных металлов IV—VI групп Периодической системы (оксиды хрома, нитриды молибдена и алюминия, дихалькогениды молибдена и вольфрама наносили вакуумными ионно-плазменными методами [5]. Триботехнические испытания проводили на воздухе при нормальных условиях на машинах трения УГС-1 по схеме диск—сфера (диаметр сферы 9,0 мм) при удельной нагрузке 10^5 Н/см^2, скорость скольжения постоянная и равна 0,019 м/с. Проведение триботехнических исследований на воздухе создает более интенсивные условия эксплуатации. Покрытия наносили при температурах подложки от 283 до 1573 К на полированные образцы компактной керамики Al_2O_3. Структуру покрытий исследовали методом дифракции электронов на отражение в электронографе ЭМР-102М, морфологию поверхности — с помощью электронных микроскопов JXA-841 и JSM-35C, элементный состав полученных покрытий — методами спектроскопии характеристического рентгеновского излучения (JEM-100C с приставкой CEVEX) и рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (ESCALAB-5) [4—22].

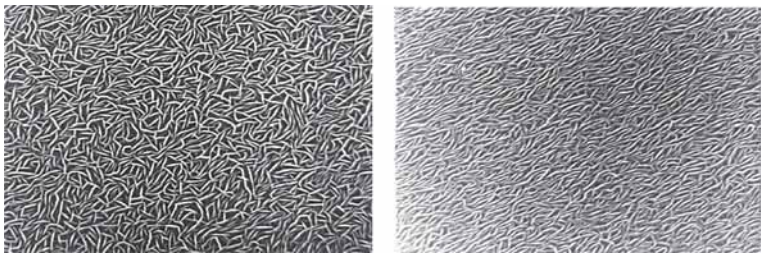
Экспериментальные результаты

Проведены исследования влияния технологических параметров нанесения на структуру и свойства покрытий из дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2). Один из основных параметров, влияющих на структуру и свойства таких покрытий, — температура. Поэтому рассмотрено влияние температуры подложки на процесс нанесения покрытий, а также формирование структуры при размещении образцов в центре и на периферии платы держателя подложек на кристаллическую структуру и триботехнические свойства.

При изменении температуры подложки формируются покрытия со структурой гексагонального дисульфида молибдена 2H—MoS_2 с ориентациями кристаллитов с осями $[10\bar{1}0]$, перпендикулярными поверхности подложки, для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 в температурном диапазоне 473...973 К и с осями $[11\bar{2}0]$ для MoS_2 при 673...773 К (рис. 1, 2). Наименее низкая температура кристаллизации характерна для покрытий из MoS_2, наиболее высокая — для WSe_2 (рис. 3). Вблизи центра платы текстуры роста с осью $[10\bar{1}0]$ наблюдали у всех дихалькогенидов, тогда как текстура с $[11\bar{2}0]$ была обнаружена у покрытий из MoS_2 в температурном диапазоне 673...773 К (рис. 1, *в*). При этом ось [0001] полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. Совпадение направления пучка электронов в колонне электронографа с радиус-вектором из центра платы приводит к возникновению симметричной дифракционной картины, причем при параллельном перемещении образца

а *б* *в*

Рис. 1. Электронограммы покрытий $MoSe_2$ (*а*, *б*) и MoS_2 (*в*) толщиной 0,5 мкм, нанесенных при температуре 553 К ($MoSe_2$), 723 К (MoS_2), при расположении образцов в центре платы (*а*, *в*) и на ее периферии (*б*)



а *б*

Рис. 2. Поверхность покрытий $MoSe_2$, наносимых при температуре 553 К толщиной 0,5 мкм, при расположении образцов в центре платы (*а*) и на периферии (*б*)

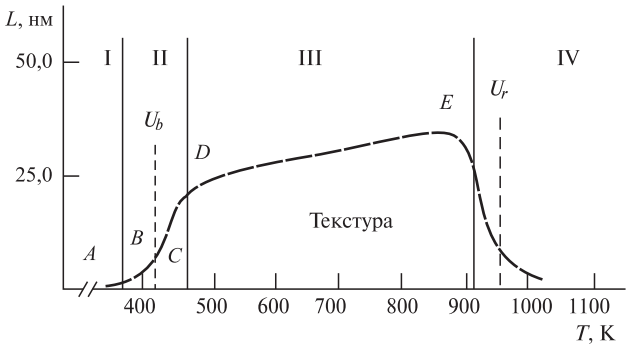


Рис. 3. Зависимость размера кристаллов *L* покрытий MoS_2 от температуры подложки *T* на образцах из Al_2O_3: I — аморфная структура; II — поликристалл; III — текстура; IV — область разложения дихалькогенида MX_2 на металл и халькоген; U_b — потенциальный барьер поверхности MoS_2; U_r — энергия разложения MoS_2

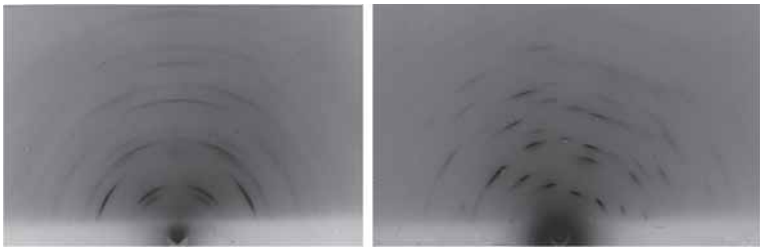
под пучком вид картины остается неизменным (рис. 1, *а* и 2, *а*). При удалении на периферию происходило плавное возникновение второй текстуры с ориентацией оси [0001] параллельно поверхности с сохранением одновременно ориентации оси $[10\bar{1}0]$ перпендикулярно поверхности подложки (рис. 1, *б*) [4—22].

Кристаллиты ориентируются практически правильно с небольшим угловым разбросом, что обеспечивает формирование дифракционной картины типа текстуры (рис. 2, *б*). При этом кристаллиты при удалении от центра платы образуют замкнутые концентрические окружности (рис. 4). Такая закономерность роста сохраняется при нанесении покрытий других дихалькогенидов молибдена и вольфрама (например, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2).

Фазовый переход от аморфной структуры к кристаллической является нелинейным, т.е. происходит в диапазоне температур (см. рис. 3) [6—13]. Однако область кристаллизации для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2, в сравнении с дисульфидом молибдена MoS_2, смещена в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической наблюдали для диселенида вольфрама WSe, что сопровождалось соответствующим смещением области более высоких триботехнических характеристик в зону более высоких температур. Это может быть связано со смещением величины потенциального барьера поверхностной энергии U_b в область более высоких температур для более тугоплавких соединений. Также такое смещение приводит к увеличению ширины области кристаллизации: наименьшая ширина области кристаллизации у MoS_2 (473...523 К), наибольшая — у WSe_2 (493...563 К) [6—14].

Текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ в покрытиях на основе дихалькогенидов являются текстурами роста, так как возникают не на стадии зарождения, а на более поздних стадиях. Так, например, в случае нанесения дисульфида молибдена на полированные образцы из стали или Al_2O_3 при температуре 523 К покрытие неоднородно по толщине. Покрытия толщиной менее 0,08 мкм обладают аморфной структурой и имеют ровную поверхность. При фрикционных испытаниях такие покрытия не проявляли антифрикционного действия, как и в случае нанесения покрытий при низких температурах подложки. Покрытия, полученные при указанных условиях и толщиной более 0,1 мкм, имели хорошие антифрикционные свойства [4—22].

Растущая структура покрытий имеет характерный вид дендритной структуры с гребнеобразной формой. В результате конкурентного отбора в процессе нанесения покрытия преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами $(10\bar{1}0)$, имеющие наиболее высокую поверхностную энергию. При этом атомно-гладкие



а *б*

Рис. 4. Электронограммы покрытий AlN толщиной 2,5 мкм при расположении образцов в центре платы (*а*) и на ее периферии (*б*)

плоскости (0001) растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов в область кристаллизации, что обеспечивает рост кристаллитов в виде пластинок.

Увеличение температуры подложки выше температуры нелинейного фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической приводит к дальнейшему практически линейному росту размера кристаллов в покрытиях при сохранении дендритного строения поверхности для покрытий всех дихалькогенидов (см. рис. 3). При фрикционных испытаниях дихалькогенидные покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционного действия, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. Антифрикционные свойства кристаллических покрытий с ростом размера кристаллитов повышались пропорционально размеру кристаллов.

Дальнейшее улучшение триботехнических свойств покрытий возможно посредством изменения технологии нанесения и создания легированных многослойных покрытий с износостойким подслоем. Например, увеличение твердости подложки приводит к снижению коэффициента трения и росту долговечности покрытий на основе дихалькогенидов, что объясняется легкостью раскалывания кристаллитов и формированием преимущественной ориентации оси [0001] перпендикулярно поверхности трения, обеспечивающей легкость скольжения пакетов X—M—X (X — халькоген, M — металл) дихалькогенида друг относительно друга. Также триботехнические и физико-механические характеристики улучшаются при легировании дисульфида молибдена [4—22].

Механизм роста износостойких покрытий, используемых в качестве твердого износостойкого подслоя, из оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия аналогичен механизму роста кристаллитов при нанесении покрытий из нитрида алюминия AlN, имеющего гексагональную кристаллическую структуру с решеткой вюртцита, методом магнетронного распыления (см. рис. 4). По мере удаления от центра формируются покрытия с осью $[10\bar{1}0]$ при наличии одновременной ориентации второй оси текстуры [0001] по радиусам из центра платы. Угол наклона второй оси [0001] кристаллитов в сторону центра платы к поверхности подложки — 15° при соответствующем наклоне основной оси текстуры $[10\bar{1}0]$ в сторону центра соответственно.

При нанесении вакуумными ионно-плазменными методами и методом электронно-лучевого испарения (РЭП) покрытий из чистого молибдена и хрома, а также их соединений типа нитридов и оксидов с кубической объемно-центрированной кристаллической решеткой, в центре платы на образцах формировалось покрытие с осью текстуры [110]. По мере удаления на периферию происходил постепенный наклон оси текстуры [110] в сторону центра (вплоть до перехода в текстуру с осью [111]) при одновременной ориентации оси [100] по радиусам из центра платы. В этом случае также сохранялся подобный механизм роста кристаллов.

Покрытия Cr_2O_3 имели тригональную структуру (пространственная группа $D_{3d}^6 — R\bar{3}c$). Рост кристаллов Cr_2O_3 подчиняется той же закономерности — в центре платы формируется текстура с осью $[10\bar{1}0]$, перпендикулярной поверхности подложки. При удалении к периферии наблюдали плавный наклон оси $[10\bar{1}0]$ к центру с одновременной ориентацией оси [0001] по радиус-вектору, выходящему из центра держателя образцов. Отсутствие двумерной вытянутости кристаллов, как в случае дихалькогенидов переходных металлов, связано с незначительной анизотропией поверхностной энергии соответствующих кристаллографических граней.

Полученные результаты свидетельствуют о возникновении подобия на разных шкалах измерения покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2), а также подобия покрытий на основе оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, наносимых ионным распылением в вакууме. Подобие структуры покрытий заключается в формировании текстур с двумя осями (рис. 5) [4—22].

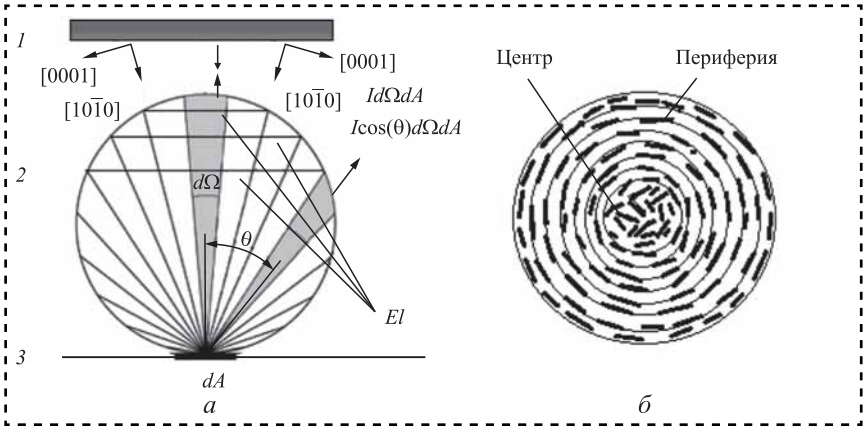


Рис. 5. Поверхность покрытий:
а — покрытие сбоку; *б* — поверхность покрытия сверху

Легированные покрытия из дисульфида молибдена MoS_2D_x по внешнему виду практически не отличаются от обычных покрытий MoS_2. В качестве легирующего вещества D могут быть выбраны элементы или соединения, не образующие сильных (химических) связей с основной решеткой MoS_2. При фрикционных испытаниях по схеме диск—сфера покрытий с кристаллической структурой гексагонального дисульфида молибдена 2H—MoS_2 получены достаточно низкие значения коэффициента трения, но в целом соответствующие трению природного дисульфида молибдена. Однако фрикционные испытания в тех же условиях покрытий состава MoS_2D_x привели к получению необычно низких значений коэффициента трения (эффекта сверхнизкого трения) (рис. 6).

Электронографические исследования покрытий MoS_2D_x показали, что в них произошло значительное увеличение периода решетки вдоль оси *c* до 1,38...1,43 нм против 1,2295 нм для соединений со стехиометрическим составом (гексагональный 2H—MoS_2) при практически неизменном периоде вдоль оси *a*. Увеличение расстояния между слоями при размещении атомов D в межпакетных пространствах в силу того, что энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия меняется пропорционально r^{-6}, должно приводить к уменьшению этого взаимодействия практически на порядок. В соответствующих условиях возможна реализация движения таких атомов без диссипации энергии в виде эффекта сверхнизкого трения. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и сопровождается возрастанием долговечности покрытия в несколько раз.

Исследованиями установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из дихалькогенидов с кристаллической структурой, покрытия с аморфной структурой практически неработоспособны. Легирование кристаллических покрытий приводит к получению эффекта сверхнизкого трения.

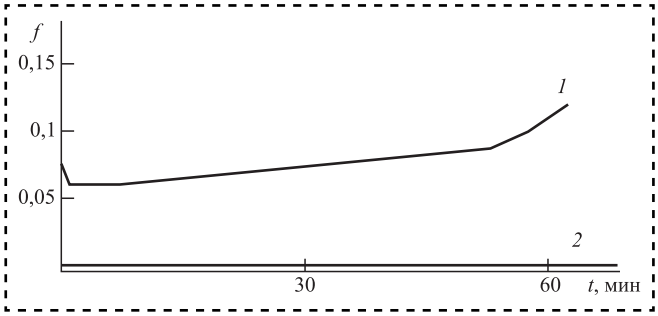


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности испытаний легированных покрытий на основе дисульфида молибдена:
1 — MoS_2; *2* — MoS_2D_x

В работах [4—18] рассмотрены причины возникновения движения потоков частиц без диссипации энергии на основании подобия двухфазных явлений (процесса трения, текучести жидкости, проводимости электрического тока, роста кристаллов в вакууме, термоэлектричества) и определены критерии подобия как соотношение количества двух фаз (потоков частиц) с различными свойствами.

Пространство и время как потоки среды

Пространство и время представляют собой атрибуты материи, определяемые ее связями и взаимодействиями. Пространство и время не существуют вне материи и независимо от нее. Понятие пространства возникло на основе наблюдения и практического использования объектов, их объемов и протяженности, понятие времени — на основе восприятия человеком смены событий, смены состояний предметов и круговорота различных процессов. Теория относительности объединяет пространство и время в единый четырехмерный пространственно-временной континиум, пространственно-временные свойства тел зависят от скорости их движения. Представим случай, когда с каждой точкой пространства связывается значение некоторого скаляра или вектора. Рассматриваемая часть пространства называется тогда полем, скалярным или векторным. Различают два основных типа векторных полей: потенциальные (безвихревые) и вихревые (соленоидальные) поля. Физические свойства их различны. Потенциальное поле тесно связано со своим источником, линии поля имеют начало и конец. Линии вихревого поля всегда непрерывны и не имеют источников.

Инерциальные системы отсчета (ИСО). В основе теории относительности лежит фундаментальный физический принцип относительности, согласно которому все физические процессы в инерциальных системах отсчета протекают одинаково, независимо от того, неподвижна ли система или она находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения. Инерциальной называется система отсчета, по отношению к которой пространство является однородным и изотропным. Теория относительности позволяет определить преобразования в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями. Равномерное движение представляет собой перемещение по эквипотенциальным поверхностям с посто-

янной скоростью. Движение с постоянной скоростью согласно законам инерции происходит без диссипации энергии по эквипотенциальным поверхностям. Кроме того, равномерное движение в своей основе подразумевает движение с постоянной скоростью по искривленным эквипотенциальным поверхностям без диссипации энергии, например, поверхности электростатического поля или поверхности Ферми. Поверхность Ферми — эквипотенциальная поверхность постоянной энергии в *k*-пространстве, равной энергии Ферми в металлах или вырожденных полупроводниках. Чаще всего в качестве примера инерциальных систем отсчета принимают железнодорожный вагон на поверхности Земли или корабль на поверхности воды (рис. 7).

Движение этих систем отсчета не является прямолинейным в строгом смысле, оно происходит по земной поверхности, которая является римановой с положительной кривизной поверхности, т.е. эквипотенциальная поверхность в этом случае является римановой с положительной кривизной. При переходе от одного какого-либо события, характеризуемого четырьмя пространственно-временными координатами, от одной системы отсчета к другой в другой инерциальной системе, необходимы преобразования координат и времени при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой (например, преобразования Лоренца).

Преобразованиями Лоренца в физике называют преобразования, которым подвергаются пространственно-временные координаты (x, y, z, t) каждого события при переходе от одной ИСО к другой. Аналогично преобразованиям Лоренца при таком переходе подвергаются координаты любого четвертого вектора. Рассмотрим преобразования Лоренца для пространственных координат и времени для электрического и магнитного поля в разных системах отсчета.

Представления Лоренца об электронном строении вещества основаны на предположении о существовании эфира и представлениях

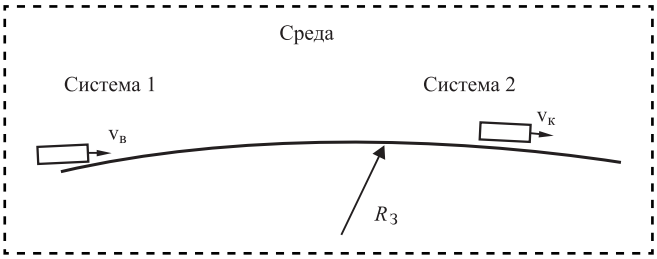


Рис. 7. Движение инерциальных систем отсчета по земной поверхности (кривизна $R_З$) с постоянной скоростью: *1* — вагон, движущийся со скоростью $v_в$; *2* — корабль, движущийся со скоростью $v_к$

электродинамики Лоренца о строении и движении электронов, согласно которым при движении материального тела происходит его сжатие вдоль направления перемещения пропорционально скорости перемещения, что связано с упругим взаимодействием движущейся частицы с особой средой, названной эфиром. В ходе дальнейших исследований не было подтверждено влияние эфира на изменение геометрии тел. Поэтому изменение размеров тела в процессе движения принято в виде постулата. Кроме того, наличие статического электрического поля при кулоновском взаимодействии не объясняет причину возникновения движения пробной заряженной частицы по закону Кулона. В реальных физических системах энергетически выгодным является движение непрямолинейное и равномерное. Это движение без рассеяния энергии по имеющим кривизну эквипотенциальным поверхностям. Движение с ускорением происходит по радиусам потенциального векторного поля до фазового перехода частицы в новое состояние с излучением соответствующего кванта энергии и формированием равновесия.

Движение по геодезическим линиям. Согласно общей теории относительности (ОТО) движение материальной точки в поле тяготения рассматривается как свободное "инерциальное" движение. В ОТО был сделан шаг к криволинейному инерциальному движению по *геодезической линии движения частиц.* Геодезическая линия — кривая определенного типа, обобщающая понятие "прямая" для искривленных пространств. Конкретное определение геодезической линии зависит от типа пространства. Например, на двумерной поверхности, вложенной в евклидово трехмерное пространство, геодезические линии — это линии, достаточно малые дуги которых являются на этой поверхности кратчайшими путями между их концами. На плоскости это будут прямые, на круговом цилиндре — винтовые линии, прямолинейные образующие и окружности, на сфере — дуги больших окружностей. Геодезические линии активно используются в релятивистской физике. Так, например, пробное тело в общей теории относительности движется по геодезической линии пространство—время. Временная эволюция всех лагранжевых систем может рассматриваться как движение по геодезической линии в специальном пространстве. Таким образом, представима вся теория калибровочных полей. Движение без рассеяния энергии осуществимо по эквипотенциальным поверхностям среды. Однако в основе теории относительности лежит четвертый вектор пространства—времени, состоящий из точек, что приводит к несо-

вместимости с квантовой механикой, в основе которой лежат частицы-корпускулы, которые также имеют волновые свойства. Это говорит о корпускулярно-волновом строении частиц.

В теории относительности был получен ряд важных выводов: свойства пространства—времени зависят от движущейся материи; луч света, обладающий инертной, а следовательно, и гравитационной массой, должен искривляться в поле тяготения; частота света под действием поля тяготения должна смещаться в сторону более низких значений.

Следовательно, в реальном окружающем мире вообще отсутствует строго прямолинейное движение. Приведем в соответствии с изложенным представления о движении электрона с собственным полем в среде. Реальные физические процессы — электрический ток, процесс трения, движение жидкостей, рост кристаллов — неравновесные диссипативные процессы, потоки энергии и вещества вдали от равновесия. В неравновесных процессах возможно возникновение стационарных потоков вещества, движущихся без диссипации. Классическая неравновесная термодинамика основана на предположении о локальном равновесии в целом неравновесной диссипативной системы. На основании этого разработана флуктуационно-диссипативная теорема, связывающая спектральную плотность флуктуаций системы с ее диссипативными свойствами [24—25].

Понятие эквипотенциальной поверхности применимо к любому потенциальному векторному полю, например, к статическому электрическому или ньютоновскому гравитационному полю. Эквипотенциальная поверхность — это поверхность, на которой скалярный потенциал данного потенциального поля принимает постоянное значение (поверхность уровня потенциала). Движение без диссипации энергии отвечает принципу наименьшего действия, соответствующему движению вещества по пути наименьшего сопротивления.

Диссипативная система (или диссипативная структура) — это открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия; устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии рассеивания энергии, которая поступает извне. Диссипативная система иногда называется *стационарной открытой системой* или *неравновесной открытой системой*, характеризуется спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Простым примером такой системы являются ячейки Бенара. В качестве более сложных примеров можно назвать лазеры, реакцию Белоусова—Жаботинского и даже биологическую жизнь. В таких системах возникают вихревые структуры, в устойчивом состоянии широко распространенные в природе — рост кристаллов, раковины, атмосферные вихри, вихри воды. Современная теория относительности, квантовая механика, термодинамика не объясняют возникновения вихревых структур. Вселенная после Большого взрыва (общепринятой космологической модели развития Вселенной) имеет достаточно однородную сотовую структуру, солнечная система и Земля являются подобием планетарных систем мира, поэтому далее воспользуемся этой аналогией. Исследуем технологию получения потоков вещества, движущихся без диссипации энергии (в реальных физических системах отсутствует прямолинейное движение без диссипации энергии).

Рассмотрим электрон с окружающим его полем и формирование окружающей среды. Движение без диссипации энергии осуществляется по эквипотенциальным поверхностям вдоль вихревого векторного поля поперек силовых линий потенциального векторного поля. В электроне при определенной плотности среды существует несколько кривых поля (положительной и отрицательной кривизны), взаимосвязанных с постоянными строения частицы (см. рис. 7). Существует ряд возрастающих по величине взаимодействий: от близкодействующих сильного ядерного и электромагнитного до межмолекулярного ван-дер-ваальсового. Близкодействие определяется расстояниями взаимодействия, соизмеримыми с размерами частиц. Далее существует дальнодействующее гравитационное взаимодействие, действующее на больших расстояниях. Энергия электромагнитного взаимодействия больше в сравнении с гравитационным взаимодействием в $4{,}17 \cdot 10^{42}$ раз [29—32].

Частицы и среда как единое целое

Электрон и среда, в которой он находится, включают несколько экспериментально измеренных параметров: r_{me} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния); $r_{де}$ — комптоновский радиус электрона; c_0 — скорость света; α — постоянную тонкой структуры; $\lambda_{де}$ — комптоновскую длину волны вероятности; h — постоянную Планка; ν — частоту колебаний электрона; q — заряд [18, 19]. Эти параметры свидетельствуют о наличии волновых и корпускулярных (квантовых) свойств электрона. Исследование ряда явлений (излучения раскаленных тел, фотоэффекта, атомных спектров) привели к выводу, что энер-

гия испускается и поглощается не непрерывно, а дискретно, отдельными порциями (квантами). Фундаментальная физическая постоянная определяет квантовые свойства материи и является постоянной тонкой структуры (ПТС). Масса покоя электрона m_e — это масса в системе отсчета, относительно которой данная частица покоится. Масса электрона может быть переменной в зависимости от его скорости. Электрон имеет собственный момент количества движения (спин) S, равный дробной или целочисленной (1/2 или 1) постоянной Планка

$$h = m_e c_0 \lambda_{де}, \quad (1)$$

где c_0 — измеренная скорость света [34, 35].

Радиус кривизны r_{me}, определяющий массу и энергию, для электрона можно найти по формуле

$$r_{me} = \mu_0 q^2/4\pi m_e. \quad (2)$$

Тогда масса электрона [34, 35]:

$$m_e = \mu_0 q^2/4\pi r_{me}. \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) следует постоянство скорости света c_c в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями v_v. В то же время в сильных гравитационных полях c_c будет замедляться пропорционально плотности среды ρ_c и β.

Таким образом, приходим к взаимосвязанным уравнениям (2) и (3), подобным преобразованию Лоренца для движущегося тела, с использованием не линейной, а синусоидальной скорости света c_c. Вокруг частицы существует электрическое поле, которое подчиняется законам Максвелла. Элементарная частица (электрон) с электрическим полем находится в среде, формируемой полями других частиц, и сама среда определяет подобие параметров и характеристики (радиус массы $1/r_{me}$, волновой радиус $r_{де}$, спин $1/2h$) частиц (рис. 8). Представленные константы — критерии подобия, которые в свою очередь, также состоят из измеренных констант. Например, постоянная тонкой структуры α, постоянная Планка h, а также линейная скорость света c_0, при изменении параметров, их составляющих, сохраняют постоянство отношения этих параметров. Электрону присуще линейное изменение энергии поля и нелинейный рост массы вблизи центра частицы (на длине волны де Бройля) (рис. 9).

Поле отрицательного заряда имеет отрицательную кривизну пространства (геометрия Лобачевского), положительного заряда с положительной кривизной (геометрия Римана). Эти пространственные поля зеркально симметричны

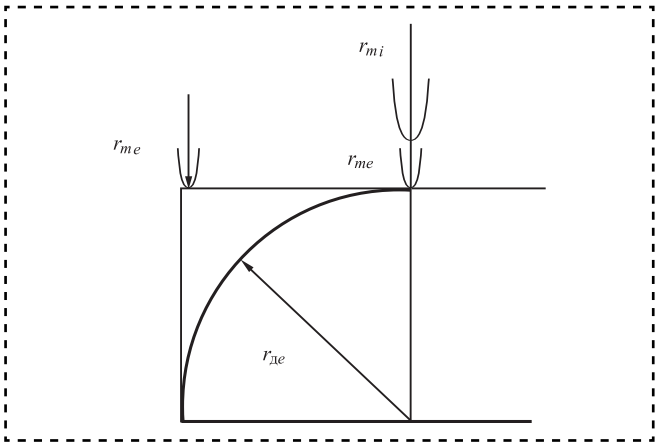


Рис. 8. Кривизна поля в разных областях электрона:
r_{me} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния), радиус кривизны массы; $r_{де} = \alpha r_{me}$ — комптоновский радиус электрона (α — постоянная тонкая структура); $2\pi r_{де}$ — дебройлевская длина волны электрона

и обладают одинаковыми свойствами, их наложение приводит к формированию поля с прямоугольной геометрией Евклида (квазиевклидовой геометрией).

Рассмотрим среду согласно принципу суперпозиции, который подразумевает аддитивность всех полей, создаваемых источниками, в свою очередь аддитивными, и линейность основных уравнений теории. При взаимодействии заряженных частиц возникают частицы (фотоны, мюон, атом водорода) с полем нейтрального заряда типа гравитационного, которое соответствует теории дальнодействия [19—22, 26—40].

Суммарное поле всех частиц аддитивно, подчиняется принципу суперпозиции и формирует вихревую среду с элементами подобия, в которой находятся другие подобные друг другу и плотности среды с кривизной k_r и радиусом $r_д$ элементарные частицы. Тем самым суммарное поле всех частиц определяет среду, в которой находятся частицы. Радиус кривизны r_{mi} в каждой точке i увеличивается пропорционально $r_{дi}$. Время одного оборота точки A (см. рис. 9) комптоновской волны частицы составляет $t_{де} = 10^{-20}$ с и образует плоскость в виде диска, но при дополнительном поперечном вращении со скоростью c_{ci} при $n_e = 1/\alpha$ и c_{ci} вокруг центра становится сферической волной вероятности нахождения элементарной частицы. Сфера возникает в результате прецессии вращающейся частицы с полем. Полное время формирования области в виде сферы вероятности обнаружения частиц состоит из произведения времени одного цикла, умноженного на постоянную тонкой структуры α. При $n_e = \alpha$ диск превращается в сферу и представляет

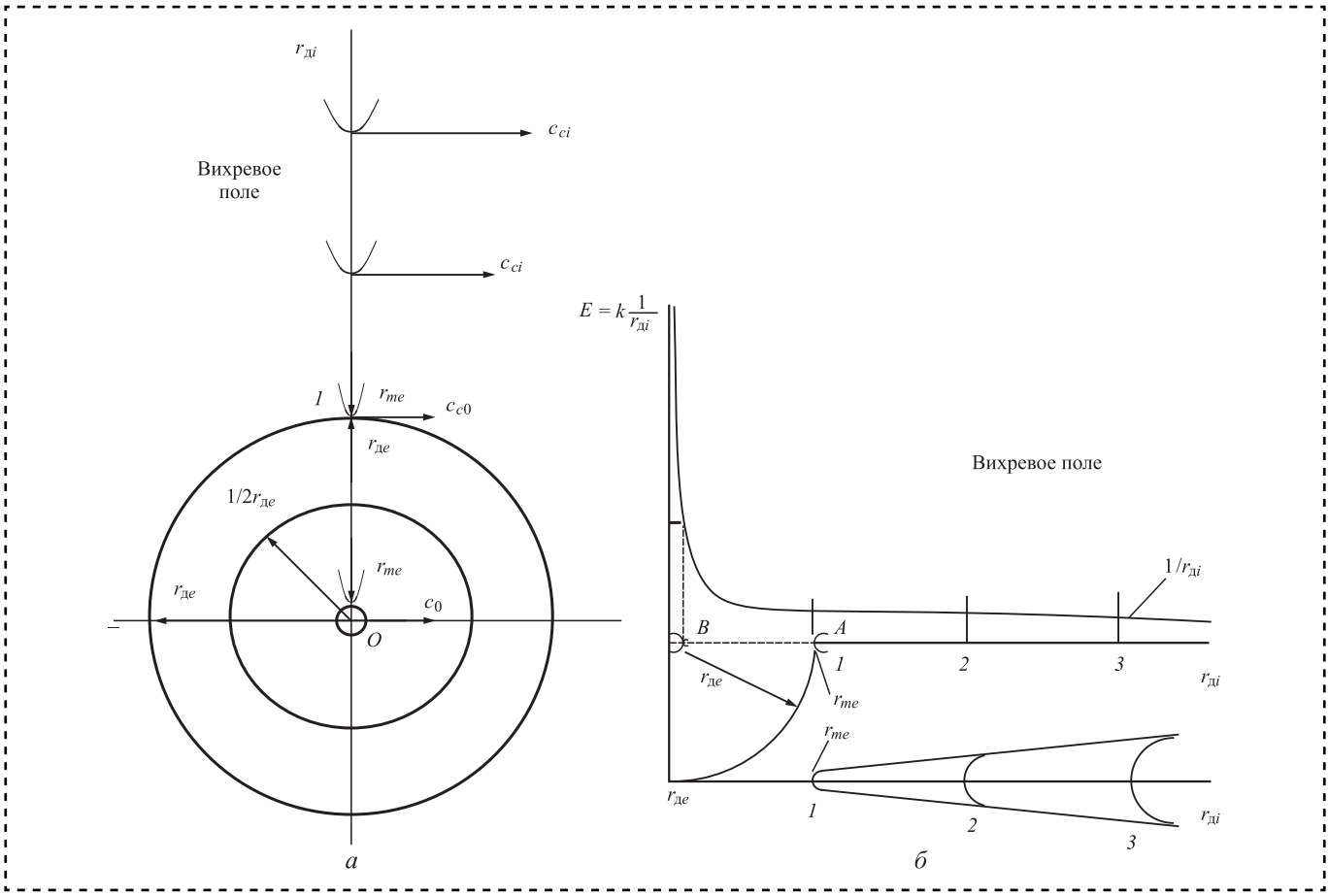


Рис. 9. Строение электрона (*а*) и вихревого поля электрона (*б*)

собой сферическое облако вероятности $\alpha\lambda_{де}$ нахождения массы электрона. Тем самым формируется волна плотности вероятности, отражающая распределение функции обнаружения электрона. Основным критерием подобия является время, за которое происходит формирование облака частицы $t_{пр} = n_{e\alpha}t_{др}$, определяющее форму частицы. Отсюда возникает квантово-механическая природа частицы, представляющей собой сферическую волну вероятности обнаружения кривизны электронной массы r_{me}. Позитрон практически тождественен электрону, при наличии положительной кривизны заряда, обратной кривизне электрона.

Результаты наблюдений подтверждают, что Вселенная возникла в определенный момент времени из сингулярного состояния в виде большого взрыва [26—37]. Это общепринятая космологическая модель, описывающая раннее развитие Вселенной, а именно — начало расширения Вселенной, перед которым Вселенная находилась в сингулярном состоянии. Космологическое сингулярное состояние Вселенной в определенный момент времени в прошлом, когда плотность энергии (материи) и кривизна пространства-времени были порядка планковских значений, подобно веществу черной дыры. Черная дыра есть особое состояние материи, граница этой области называется горизонтом событий, а ее характерный размер — гравитационным радиусом. Это состояние, вместе с последующим этапом эволюции Вселенной, пока плотность энергии (материи) оставалась высокой, называют также Большим взрывом. Постоянство колебаний всех частот $\gamma_{де} = 1/t_{де}$ и постоянство угловой скорости $\omega_{де} = 2\pi/t_{де}$ всех частиц Вселенной позволяет рассматривать ее как единую диссипативную систему. Космологическая сингулярность является одним из примеров гравитационных сингулярностей. Сформированная среда посредством поля связывает все частицы Вселенной и в свою очередь определяет строение находящихся в ней частиц.

Поэтому состояние пробной частицы полностью определяется локальным состоянием среды, в которой частица находится. Частица находится в равновесии и неподвижна относительно локальной системы координат. В случае нарушения локального равновесия (нарушение равновесия происходит при возмущении среды, напри-

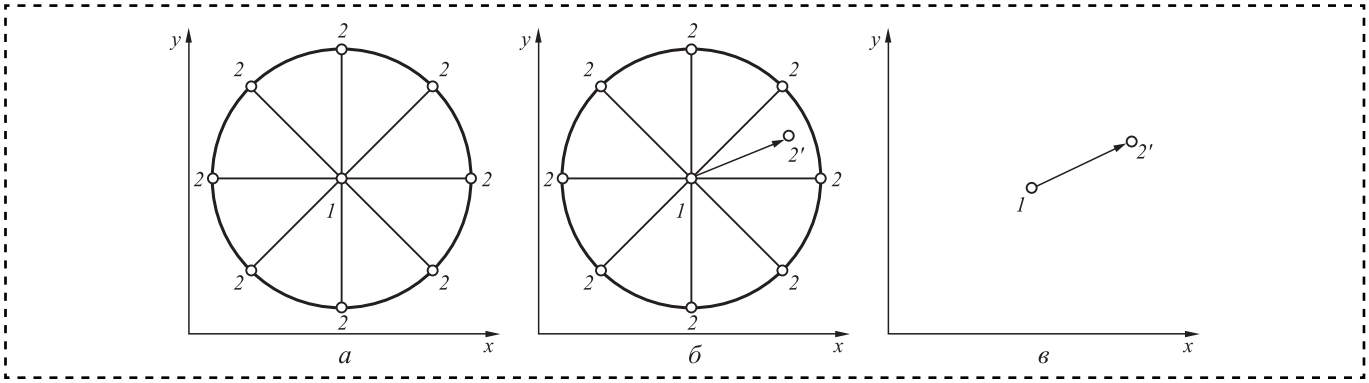


Рис. 10. Взаимодействие пробной частицы *1* с частицами *2* в их симметричном поле (*а*), с нарушенным равновесием (*б*), двух частиц (*в*) в среде

мер, с появлением возмущающей частицы в виде флуктуации) частица движется в зависимости от знака заряда (рис. 10) [20—22]. Асимметричное возмущение поля среды вызывает движение пробной частицы соответственно притяжению или отталкиванию поля возмущения. Во время такого движения происходит деформация пробной частицы с возникновением фазового перехода при критической величине характерного параметра (потенциального барьера). Фазовый переход приводит к перекрестному излучению фотонов в виде потоков тепла с передачей вихревого движения частиц растущего кристалла.

Взаимодействие определяет возникновение элементов подобия между средой и частицами. Потенциальное поле среды в точке характеризуется кривизной k_r, радиусом r_{mi} и плотностью среды ρ_c, которая формируется из полей элементарных частиц и является суммой радиусов кривизны вихревых полей:

$$1/r_{me} = \sum_{i=1}^{n} 1/r_{mi}. \qquad (4)$$

Математически скорость света c_c является пределом суммы ряда обратных величин скорости вихревых полей всех частиц в данной точке пространства и определяет скорость света в векторной точке как скорость движения суммы полей $1/c_{c0} = \sum_{i=1}^{n} 1/c_{ci}$. Такой вывод можно сделать из принципа подобия следующими рассуждениями. Радиусы кривизны массы вихревой среды как предел суммы вихревых полей $1/r_{me}$ и тем самым скорость света c_{c0} можно представить математически пределом суммы числового ряда полей всех частиц в данной точке векторного поля. Отношение $r_{де}/r_{me}$ представляет собой кривизну массы r_{me} с неевклидовой геометрией (типа геометрии Лобачевского) к кривизне $r_{де}$ с неевклидовой геометрией (типа геометрии Римана) и равно $\alpha = 7{,}2973525664(17)\cdot 10^{-3} = 1/137{,}035\,999\,139(31)$ (постоянной тонкой структуры) [34, 35]. Тем самым постоянная тонкой структуры представляет собой отношение пределов числовых последовательностей r_{me} и $r_{де}$. Отношение является постоянной как критерий подобия, а кривизны зависят от плотности среды ρ_c [4—22].

Передача взаимодействия происходит за временной промежуток $t_{де}$ ($t_{де} = r_{де}/c_0$, где c_0 — измеренная скорость света; $\lambda_{де}$ — комптоновская длина волны [34, 35]). За время $t_{де}$ происходит формирование и обновление всех систем, состоящих из частиц, что является подобием системы с одинаковой тактовой частотой. Отсюда следует постоянство частоты колебаний $\gamma_{де} = 1/t_{де}$. Строение частиц со смещенным центром масс полностью согласуется с представлениями об облаке вероятности электрона [4—22]. Неевклидова геометрия среды проявляется на малых расстояниях ($<10^{-10}$ м) и подчиняется теории близкодействия.

Основные свойства вихревого поля частицы:

— вихревое поле частицы представляет собой векторное пространство, каждая точка которого характеризуется скоростью c_{ci};

— существует смещение центра вихревого вращения поля частицы на величину α;

— область с наибольшей массой m_{e0} (и плотностью ρ_{c0}), вероятность обнаружения которой располагается на комптоновской длине волны $\lambda_{де}$, является ядром частицы;

— отношение радиусов кривизны $r_{me}/r_{де} = \alpha$, что обеспечивает размещение 126 электронов на орбите атома согласно периодическому закону;

— вихревое поле частицы вращается вокруг центра со скоростью c_{ci}, обладает такими свойствами, как ротор и дивергент;

— поле частицы может беспрепятственно проходить сквозь другие частицы и поля, однако такое прохождение поля (причина) вызывает изменение кривизны поля частицы (следствие);

— при изменении момента импульса частицы с вращающимся вихревым полем возможна прецессия такой частицы.

Кулоновское взаимодействие

Кулоновское взаимодействие двух зарядов в вакууме направлено вдоль прямой, соединяющей эти заряды, пропорционально их величинам и обратно пропорционально расстоянию между ними. Оно является силой притяжения, если знаки зарядов разные, и силой отталкивания, если эти знаки одинаковы. Взаимодействие возникает при движении пробной частицы поперек эквипотенциальных поверхностей вихревого поля. Эквипотенциальные поверхности — понятие, применимое к любым потенциальным векторным полям, например, к электрическим или гравитационным [29—37]. Различают два основных типа векторных полей: потенциальные (безвихревые) и вихревые (соленоидальные). Поведение пробной частицы электрона в поле протона описывается взаимодействием Кулона. Процесс образования атома из электрона и протона представляет собой нелинейный диссипативный процесс фазового перехода при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера). По сути, это нелинейный диссипативный процесс при движении частиц с перекрестным излучением фотонов при фазовом переходе с преодолением критической величины характерного параметра (потенциального барьера).

Наложение двух вихревых потоков и создание квантовой суперпозиции общего поля есть взаимодействие частиц. Рассмотрим систему частиц в среде, состоящей из частицы с отрицательным зарядом *1* и симметрично окруженной положительными зарядами *2* (см. рис. 10, *а*). Затем представим кулоновское взаимодействие частиц *1—2* отдельно от взаимодействия пробной частицы со средой и образование вихревого движения частицы. Каждая частица имеет вращающееся вокруг нее поле, геометрия которого зависит от знака заряда. Представленная в виде отрицательного заряда частица *1* в центре системы и окруженная частицами с положительными зарядами *2* система частиц образует среду как сумму вращающихся полей частиц с суммарной массой среды $1/r_{me} = \Sigma 1/r_{mi}$. Под влиянием симметричного окружения зарядами *2* система находится в равновесии. Далее под влиянием флуктуаций возникает локальное нарушение симметрии при сдвиге заряда *2′* и тем самым нарушение равновесия всей системы (рис. 10, *б*). Происходит взаимодействие между отрицательным зарядом *1* и зарядом *2′* с нарушенным при флуктуации равновесием. Уберем симметрично расположенные положительные частицы *2* и рассмотрим систему из двух взаимодействующих друг с другом частиц *1* и *2′* (рис. 10, *в*). Введем радиус-вектор $\mathbf{r}_{12дi} = \mathbf{r}_{1дi}$ и $\mathbf{r}_{2дi}$, где $\mathbf{r}_{1дi}$ и $\mathbf{r}_{2дi}$ радиус-векторы взаимодействующих частиц *1—2*. Расстояние между частицами равно модулю вектора $\mathbf{r}_{12дi}$.

Кулоновское взаимодействие пробной частицы (электрона) с противоположной частицей (протоном, позитроном) происходит на фоне среды, где испускаемые в результате реакции фотоны разлетаются в виде перекрестных потоков. При реакции взаимодействия электрона и позитрона ($e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$) разлет фотонов происходит под прямым углом либо углом 60° в зависимости от ориентации спинов частиц. Подобный перекрестный разлет фотонов наблюдается при взаимодействии электронов и протонов [18—22]. Соотношение между перекрестными потоками разной природы, например, потоками тепла и частиц, соответствует принципу взаимности Л. Онзагера и позволяет установить геометрическую взаимосвязь между перекрестными потоками тепла (фотонами) и частиц (потоков вещества).

Рассмотрим реакцию взаимодействия электрона и протона с образованием атома водорода. При кулоновском притяжении пробная частица (электрон) движется навстречу положительной частице в потенциальном поле последней. Потенциальное векторное поле положительного заряда вызывает ускоренное спиральное движение электрона с возникновением вращения типа вихревого [19—22]. При достижении скорости электрона $1/\alpha$ происходит излучение поляризованного фотона с переходом электрона в новое состояние с энергией 13,6 эВ, что составляет $1/\alpha$ от полной энергии электрона. В результате образуется атом водорода с вихревым движением электрона вокруг ядра атома (протона) [18—22]. Фотон с энергией 13,6 эВ излучается в среду под углом 90° и движется вдоль геодезической линии, которая представляет собой эквипотенциальную поверхность в инерциальной системе отсчета. Движение фотона в ИСО происходит с постоянной скоростью света в вакууме c_0. Именно равномерная плотность среды и, как следствие, постоянная кривизна пространства обеспечивают постоянство скоростью света.

Введем безразмерный коэффициент массы

$$k_m = \mu_0 q^2/4\pi,$$

где μ_0 — магнитная постоянная;

q — элементарный заряд.

Плотность среды ρ_n определяется количеством массы m_n, находящейся в единице объема V_n:

$$\rho_n = m_n/V_n. \quad (5)$$

Обратная величина скорости вихревого поля c_c определяется как скорость движения суммы полей частиц c_{ci} в точке пространства:

$$1/c_c = \Sigma 1/c_{ci}. \quad (6)$$

Математически скорость света c_c является пределом суммы ряда обратных величин скорости вихревых полей всех частиц в данной точке пространства, которая и определяет скорость света в векторной точке как скорость движения суммы полей $1/c_{c0} = \sum_{i=1}^{n} 1/c_{ci}$.

Рассмотрим кулоновское взаимодействие пробной частицы отдельно от взаимодействия этой частицы со средой, а также свободный электрон в среде и определим полную энергию [29—37].

Электрон при одном полном цикле (оборот вокруг центра) колебания $n_e = 1$ (по сути, комптоновской длиной волны электрона) представляет собой диск [2—11]. Комптоновская длина волны может быть получена из формулы дебройлевской длины волны $2\pi r_{де}$ путем замены скорости частицы v на скорость света c_0 [34, 35]:

$$\lambda_{де} = h/m_e c_0, \quad (7)$$

где r_{me} — классический радиус электрона [21] (см. рис. 10, *а*), определяющий его массу и равный

$$r_{me} = \mu_0 q^2/4\pi m_e. \quad (8)$$

Вихревое перекрестное движение поля (поток поля) с вращением точки *A* поля кривизной с r_{me} вокруг центра *O* вызывает соответствующее движение частицы (см. рис. 9). Масса частицы определяется обратным радиусом томсоновского рассеяния $1/r_{me}$ при движении по комптоновскому радиусу $r_{де}$. Следовательно, отношение классического радиуса электрона r_{me} к комптоновскому радиусу электрона $r_{де}$ равно α. Поля частиц подчиняются уравнениям Максвелла.

Передача взаимодействия происходит за временной промежуток

$$t_{де} = r_{де}/c_0, \quad (9)$$

где c_0 — измеренная линейная скорость света [15, 16].

За время $t_{де}$ происходит формирование и обновление всей системы частиц, находящихся на разных расстояниях. Система является подобием всех содержащихся в ней частиц с вращающимися полями с одинаковой тактовой частотой и определяет состояния всех частиц. Строение частиц со смещенным центром масс от центра частицы *O* соответствует представлениям об облаке вероятности электрона [4—10, 20—22]. Следовательно, элементарная частица представляет собой комптоновскую волну радиуса $r_{де}$ как вероятность обнаружения классического радиуса $\mathbf{r}_{me}$ электрона, определяющего массу. Такая среда определяет вихревые свойства находящихся в ней частиц. Магнитные и гравитационные поля являются вихревыми полями.

Для сохранения этого принципа суммы полей среды должны иметь соответствующие движению частицы моменты количества движения. Исследование движения частиц и процесса передачи движения от среды к находящейся в ней частице соответствующего количества движения осуществим с использованием закона Кулона. Тем самым суммарные поля всех частиц определяют среду, в которой находятся частицы. Сформированная полями среда в свою очередь определяет строение находящихся в ней частиц. Взаимодействие определяет возникновение элементов подобия между средой и частицами.

Формирование свойства среды и причины вихревого (по спирали в виде соленоида) движения изложены в работах [4—22]. Электромагнитные и гравитационные поля, создающие среду, — особая форма материи, которая создается электрическими зарядами и оказывает воздействие на другие заряды. Плотность среды ρ_c — количественная характеристика суммарного поля — определяется принципом суперпозиции суммарной массы поля в единице объема среды. Результат воздействия на частицу нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил. Любое сложное движение можно разделить на два и более простых. Поведение электрона определяется свойствами среды, в которой находится электрон. Частица с полем есть одно целое, в каждой точке пространства действует принцип квантовой суперпозиции.

Скорость передачи сигнала в диссипативной системе соответствует частоте выравнивания флуктуаций соответственно флуктуационно-диссипативной теореме

$$t_{де} = r_{де}/c_0 = 0{,}4043913 \cdot 10^{-20} \text{ с}. \quad (10)$$

Энергия фотона E_γ, излучаемого атомом водорода, кратна постоянной тонкой структуры электрона $E_e = mc^2/\alpha = 13{,}6$ эВ.

За это время происходит формирование и обновление всех систем, состоящих из таких частиц, что является подобием системы с одинаковой тактовой частотой. Отсюда следует постоянство частоты колебаний $\gamma_{де} = 1/t_{де}$ и постоянство угловой скорости $\omega = 2\pi/t_{де}$. Строение частиц со

смещенным центром масс полностью согласуется с представлениями об облаке вероятности электрона [5—10, 25—27]. Неевклидова геометрия среды проявляется на малых расстояниях (менее 10^{-10} м).

В уравнениях Ампера и Максвелла электродинамическая постоянная c_0 связана с электрической ε_0 и магнитной постоянной μ_0 соотношением $1/c_0 = \mu_0\varepsilon_0$.

Необходимо учитывать влияние среды как полной энергии, состоящей из суммы потенциальной U_p и кинетической энергии E_k [29]:

$$W_s = U_p + E_k. \quad (11)$$

Изменение квадрата импульса при движении частицы можно представить в виде выражения

$$m_{e1}^2 c_c^2 = m_{e0}^2 c_c^2 + m_{ev1}^2 \mathrm{v}^2. \quad (12)$$

Взаимодействие двух частиц с последующим движением под действием электрического поля осуществляется по правилу треугольника в векторной форме

$$\mathbf{C}_\mathrm{c} = \mathbf{C}_\mathrm{v} + \mathbf{V}_\mathrm{v}, \quad (13)$$

где $\mathbf{C}_\mathrm{c}$ — синусоидальная скорость света, $\mathbf{C}_\mathrm{c} = 4\pi c_0$;

$\mathbf{C}_\mathrm{v}$ — скорость движения по радиусу $\mathbf{r}_{\text{д}e\mathrm{v}}$;

$\mathbf{V}_\mathrm{v}$ — скорость движения частицы.

Тогда в скалярном виде разложение скорости c_c равно $c_c^2 = c_\mathrm{v}^2 + \mathrm{v}_\mathrm{v}^2$.

Перекрестный поток потенциального поля вызывает вращательное движение частицы вдоль силовых линий второй частицы. Поэтому основное свойство Вселенной — существование равновесия энергетического уровня частиц с плотностью ρ_n потенциального поля в точке измерения энергии частицы. Стремление занять наименьший уровень выражается принципом минимальной энергии:

$$E_e = m_e c^2 = \mu_0 q^2 c^2 / 4\pi r_{me}. \quad (14)$$

От кулоновского взаимодействия между электрически заряженными частицами перейдем к взаимодействию нейтральных спаренных атомов с образованием молекул [29—39].

Электроны в атоме движутся по эквипотенциальным поверхностям атомных орбиталей, образуемых протонами, из которых формируются ядра атомов. Протон p^+ состоит из двух положительных и одной отрицательной частиц (кварков), полученных в результате деления e^+ и e^- на частицы с суммарным спином 1/2 и дробными зарядами. Описанная деформация симметрии двух кварков в положительно заряженном пионе, вызванная принципом запрета Паули, и смещение одного кварка из симметричного положения компенсируются наиболее массивным отрицательным кварком. В протоне вблизи центра масс образуется область с отрицательным зарядом от отрицательной частицы $r_{\text{д}Q}^{-1}$ с наибольшей массой и наименьшими размерами, и двумя вращающимися вокруг него кварками с положительным зарядом $r_{\text{д}Q}^{+1}$. Суммарная кривизна двух положительных частиц $2r_{\text{д}Q}^{+1}$ и одной отрицательной $r_{\text{д}Q}^{-1}$ в протоне составляет относительную единицу энергии электрона r_{me}^{+1} (соответствует потенциальной энергии электрона), что определяет единичный заряд протона.

Поэтому все частицы относительно подобны электрону, в то время как геометрия протона полностью подобна геометрии электрона. Сумма комптоновской длины волны трех кварков кратна α и равна $r_{\text{д}p}$. Такой отрицательно заряженный кварк компенсирует нарушение симметрии положительно заряженного пиона и приводит к формированию симметричной частицы, по своим свойствам аналогичной электрону. Суммарное поле такой частицы дает кривизну, равную кривизне электрона при удалении от геометрического центра протона, что обеспечивает постоянство заряда протона и равенство его заряду электрона. Наличие отрицательного кварка в центре протона объясняет тот факт, что отрицательно заряженный электрон никогда не "упадет" на ядро атома в силу отталкивания отрицательного заряда центрального кварка. Геометрически протон также кратен постоянной тонкой структуры α. Все частицы конструктивно построены подобно электрону. Средняя скорость вращения c_c поля вдоль волнового радиуса r_c для всех частиц подобна и растет с ростом радиуса r_c.

Энергия протона, состоящего из трех кварков, равна 938,272046(21) МэВ, что составляет 1836,15267389(17) электронных единиц энергии. На отрицательный кварк приходится 917,0763 электронных единиц энергии, на положительные кварки — 919,0763. На каждый положительный кварк приходится 1/2 от энергии кварка 459,53815 электронных единиц энергии. При сложении отрицательной и положительной кривизны масс трех кварков остаточная кривизна составит кривизну электрона с соответствующим единичным зарядом. Разница составляет кривизну единичного заряда Q^{+1}. Отрицательная кривизна на одну единицу превышает положительную кривизну двух кварков $(m^+ + m^+) - m^- = 1$. Кварки вращаются вокруг центра с правовинтовым движением на расстоянии α^- от центра частицы по радиусу $r_{\text{д}p}$ (равному $r_{\text{д}e}$ — комптоновскому

радиусу электрона). Более подвижный в сравнении с протоном электрон в дипольной паре атома образует смещение центра атомной симметрии.

Из сингулярности с особым состоянием материи Вселенной произошел Большой взрыв с образованием всех частиц. Такой подход позволяет объяснить ряд явлений. Например, отрицательный электрон состоит из трех частиц (одна отрицательная и две положительные частицы), которые в сумме дают две положительные и две отрицательные частицы, создающие симметричные системы частиц в виде атомов. Все частицы имеют одинаковую угловую частоту колебаний

$$\omega_{де} = 2\pi/t_{де} = 4{,}878250\cdot 10^{21}\ \text{с}^{-1}. \qquad (15)$$

Потенциальная функция взаимодействия двух нуклонов для ядерного взаимодействия описывается выражением [20—22]:

$$U(r) = -k\frac{\exp(-r/r_0)}{r}, \qquad (16)$$

где k — константа сильного взаимодействия, $k = 1$ в "системе констант" фундаментальных взаимодействий, где, например, постоянная электромагнитного взаимодействия равна постоянной тонкой структуры.

Такая потенциальная функция называется потенциалом Юкавы. Модуль этой функции очень быстро убывает и на расстояниях, больших r_0, уже ничтожно мал.

В принципе потенциал сильного взаимодействия пропорционален расстоянию между частицами, как и другие взаимодействия. При этом важную роль играют квантовые спутанные взаимодействия [30—33, 40—43]. Квантовая запутанность — квантово-механическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми (например, можно получить пару фотонов, находящихся в запутанном состоянии, и тогда если при измерении спина первой частицы спиральность оказывается положительной, то спиральность второй всегда оказывается отрицательной, и наоборот). Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий. Измерение параметра одной частицы приводит к мгновенному (выше скорости света) прекращению запутанного состояния другой, что находится в логическом противоречии с принципом локальности (при этом теория относительности не нарушается и информация не передается).

Энергия движущейся частицы выражается следующим образом:

$$m_{ev}^2 c_v^2 = m_{e0}^2 c_c^2 + m_{ev}^2 v^2, \qquad (17)$$

где m_{e0} — масса покоящегося электрона;

m_{ev} — масса движущегося электрона.

Перейдем от кулоновского взаимодействия заряженных частиц к взаимодействию спаренных нейтральных частиц (атомов, фотонов) в зависимости их направления спина. Электрический заряд фотона равен нулю. Фотон может находиться только в двух спиновых состояниях с проекцией спина на направление движения (спиральностью) ±1. Фотон является безмассовой частицей, способной существовать в вакууме, двигаясь в пространстве со скоростью света. Спин J ядра атома наряду с его массой является механической характеристикой системы нуклонов. Спин ядра J складывается из спиновых s_1 — s_A и орбитальных l_1—l_A моментов отдельных нуклонов:

$$\vec{J} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \ldots + \vec{s}_A + \vec{l}_1 + \\ + \vec{l}_2 + \ldots + \vec{l}_A = \vec{j}_1 + \vec{j}_2 + \ldots + \vec{j}_A. \qquad (18)$$

Атомное ядро в каждом состоянии характеризуется полным моментом количества движения J, который в системе покоя ядра называется спином ядра. Для спинов атомных ядер экспериментально установлены следующие закономерности:

- если A — четное, то $J = n$ (n = 0, 1, 2, 3,...), т.е. спин ядра имеет целочисленное значение;
- если A — нечетное, то $J = n + 1/2$, т.е. спин ядра имеет полуцелое значение;
- четно-четные ядра в основном состоянии имеют спин $J = 0$, что указывает на взаимную компенсацию моментов нуклонов в основном состоянии ядра — особое свойство межнуклонного взаимодействия.

Спин электрона в атоме — собственный момент количества движения (импульса) электрона, не связанный с движением в пространстве, чисто квантовое свойство электрона, не имеющее классических аналогов. Для полного объяснения всех свойств атома была выдвинута гипотеза о наличии у электрона спина. Для всех электронов абсолютное значение спина всегда равно 1/2. Проекция спина на ось z — магнитное спиновое число m_s — может иметь лишь два значения: $m_s = +1/2$ или $m_s = -1/2$. Поскольку спин электрона S — величина постоянная, его обычно не включают в набор квантовых чисел, характеризующих движение электрода в атоме, и говорят о четырех квантовых числах. Так как при химических реакциях ядра реагирующих атомов остаются без изменения (за исключением радиоактивных превращений), то физические и химические свойства атомов зависят, прежде всего, от строения электронных оболочек атомов.

Межмолекулярные взаимодействия и гравитация

Рассмотрим объединенные взаимодействия (ядерное, кулоновское межмолекулярное (ван-дер-ваальсово), гравитацию) и создадим общую формулу взаимодействия.

Ориентационное взаимодействие. Полярные молекулы, в которых центры тяжести положительного и отрицательного зарядов не совпадают (например, HCl, H_2O, NH_3) ориентируются таким образом, чтобы рядом находились концы с противоположными зарядами. Между ними возникает притяжение. Для взаимодействия двух диполей энергия притяжения между ними (энергия Кеезома) выражается соотношением:

$$E_K = -2\mu_1\mu_2/4\pi\varepsilon_0 r^3, \qquad (19)$$

где μ_1 и μ_2 — дипольные моменты взаимодействующих диполей;

r — расстояние между ними.

Притяжение диполь-диполь может осуществляться только тогда, когда энергия притяжения превышает тепловую энергию молекул; обычно это имеет место в твердых и жидких веществах. Диполь-дипольное взаимодействие проявляется в полярных жидкостях (вода, фтороводород).

Индукционное взаимодействие. Если полярная молекула окажется рядом с неполярными, она начнет влиять на них. Поляризация нейтральной частицы под действием внешнего поля (наведение диполя) происходит благодаря наличию у молекул свойства поляризуемости. Постоянный диполь может индуцировать дипольное распределение зарядов в неполярной молекуле. Под действием заряженных концов полярной молекулы электронные облака неполярных молекул смещаются в сторону положительного заряда и подальше от отрицательного. Неполярная молекула становится полярной, и молекулы начинают притягиваться друг к другу, только намного слабее, чем две полярные молекулы. Энергия притяжения между постоянным и наведенным диполем (энергия Дебая) определяется выражением:

$$E_Д = -2\mu_{нав}^2\,\gamma/r^6, \qquad (20)$$

где $\mu_{нав}$ — момент наведенного диполя.

Притяжение постоянного и наведенного диполей обычно очень слабое, поскольку поляризуемость молекул большинства веществ невелика. Оно действует только на очень малых расстояниях между диполями. Этот вид взаимодействия проявляется главным образом в растворах полярных соединений в неполярных растворителях.

Дисперсионное взаимодействие. Между неполярными молекулами также может возникнуть притяжение. Электроны, которые находятся в постоянном движении, на миг могут оказаться сосредоточенными с одной стороны молекулы, т.е. неполярная частица станет полярной. Это вызывает перераспределение зарядов в соседних молекулах, и между ними устанавливаются кратковременные связи. Энергия такого взаимодействия (энергия Лондона) выражается соотношением:

$$E_Л = -2\mu_{мгн}^2\gamma^2/r^6, \qquad (21)$$

где $\mu_{мгн}$ — момент мгновенного диполя.

Лондоновские силы притяжения между неполярными частицами (атомами, молекулами) являются весьма короткодействующими. Энергия такого притяжения зависит от размеров частиц и числа электронов в наведенных диполях. Эти связи очень слабые — самые слабые из всех межмолекулярных взаимодействий. Однако они являются наиболее универсальными, так как возникают между любыми молекулами.

Межмолекулярное отталкивание. Если бы молекулы только притягивались друг к другу, это привело бы к их слиянию. Но на очень малых расстояниях их электронные оболочки начинают отталкиваться. Энергия отталкивания:

$$E = k/r^n, \qquad (22)$$

где k — постоянная отталкивания;

n — принимает различные целые значения [5—15].

Общее уравнение межмолекулярного взаимодействия при постоянной температуре (уравнение Леннарда—Джонсона) носит название "потенциала 6—12", поскольку энергия притяжения пропорциональна $1/r^6$, а энергия отталкивания — $1/r^{12}$, и в большинстве случаев имеет вид [4, 9—12]:

$$E_m = -a/r^6 + b/r^{12}. \qquad (23)$$

Силы межмолекулярного отталкивания действуют на очень малых расстояниях. В целом силы притягивающего взаимодействия между телами пропорциональны кривизне среды, расстоянию между ними и могут быть выражены общей формулой, связывающей все взаимодействия с вихревыми потоками потенциальных полей частиц.

Известно, что гравитационная масса эквивалентна массе инертной. Понятие "масса" фигурирует в двух разных законах — во втором законе Ньютона и в законе всемирного тяготения. В первом случае она характеризует инертные

свойства тела, во втором — гравитационные свойства, т.е. способность тел притягиваться друг к другу. Всякое тело вблизи поверхности Земли испытывает силу притяжения

$$F = \gamma \frac{m_g M}{R_З^2} = m_g g. \quad (24)$$

Под действием этой силы тело приобретает ускорение:

$$a = \frac{F}{m_{in}} = \gamma \frac{M}{R_З^2} \frac{m_g}{m_{in}} = g \frac{m_g}{m_{in}}. \quad (25)$$

Ускорение a для всех тел одинаково: $a = g$. Следовательно и $m_g = m_{in}$. Поэтому говорят просто о массе. Тождественность инерциальной и гравитационной масс Эйнштейн положил в основу общей теории относительности. Следствием этого является тот факт, что, находясь внутри закрытой кабины, невозможно определить, чем вызвана сила mg: тем, что кабина движется с ускорением $a = g$ или действием притяжения Земли. Наряду с обменными и межмолекулярными взаимодействиями существуют гравитационные силы, действующие на достаточно больших расстояниях. Причина их возникновения, как показано, заключается в существовании собственных колебаний частиц (электронов, протонов), из которых состоят атомы высокой частоты [9—22]. Скорость передачи сигнала в диссипативной системе соответствует возможной частоте выравнивания флуктуаций $0{,}4043913 \cdot 10^{-20}$ с.

Теория близкодействия заключается в том, что всякое взаимодействие осуществляется посредством какого-то промежуточного звена (т.е. переносчика взаимодействия). Это характерно для электромагнитного (кулоновского) взаимодействия с излучением кванта света (фотона). *Теория дальнодействия* (или теория действия на расстоянии), напротив, говорит о том, что всякое взаимодействие осуществляется мгновенно и через пустоту, т.е. действие со стороны любых тел может передаваться мгновенно на сколь угодно большие расстояния. Передача взаимодействия происходит за временной промежуток $t_{де}$. Сочетание двух взаимодействий (близкодействия и дальнодействия) позволяет последовательно описывать формирование взаимодействий от сильного (и слабого) до гравитационного, а также от взаимодействий заряженных частиц до взаимодействий спаренных частиц (атомов, молекул) в системе множества частиц. Теория дальнодействия также взаимосвязана с квантовой запутанностью частиц [40]. Кроме того, существует явление гравитационной индукции. Гравитационная индукция есть свойство гравитационного поля приводить во вращение вещество, находящееся в изменяющемся потоке кручения поля. Поле кручения — силовое поле, действующее на массы и тела, находящиеся в поступательном или вращательном движении, является второй компонентой гравитационного поля в лоренц-инвариантной теории гравитации и в ковариантной теории гравитации. Возникает подобие между вихревыми потоками частиц при росте кристаллов и вихревым потоком массы в планетарной системе. Масса потока вещества при росте кристаллов аналогична потоку массы при гравитационном взаимодействии в планетарной системе.

Энергию $E_{дис}$ обычно представляют в виде разложения в ряд по обратным степеням расстояния R^n между молекулами:

$$E_{дис} = -\sum_{n=6}^{\infty} \frac{C_n}{R^n}, \quad (26)$$

где C_n — коэффициент разложения;

n — целое число (n/6).

Тогда все взаимодействия (кулоновское, межмолекулярное, гравитационное) представимы общей формулой взаимодействия:

$$E_k = -C_k/r^n, \quad (27)$$

где C_k — коэффициент пропорциональности закона взаимодействия;

r^n — расстояния между телами.

Коэффициент C_k является определяющим для вычисления природы, характера и величины взаимодействия (кулоновское, межмолекулярное, гравитационное).

Взаимодействия в твердых телах (металлические, ковалентные, ионные) являются достаточно сильнодействующими, связанными с обменом или обобществлением электронов, в то время как ван-дер-ваальсово взаимодействие проявляет себя межмолекулярными взаимодействиями между электрически нейтральными атомами или молекулами без обмена электронами [38, 39].

Энергия обменных связей, необходимая для разрыва соединенных частиц, составляет 200...1000 кДж/моль, в то время как энергия взаимодействия Ван-дер-Ваальса составляет 2...40 кДж/моль. Электромагнитные силы в атоме водорода $E_{св}$ равны 13 эВ, что составляет 1250 кДж/моль [29—39]. Причина изменения энергии обменного и ван-дер-ваальсового взаимодействия заключается в изменении энергетического потенциала потока векторного поля, проходящего через частицу. Поток заряженной частицы является односторонним, в то время как поток нейтрального заряда взаимно-встречный [29—40]. Гравитация с этой точки зрения является взаимодействием дальнодействующего

притяжения. Известен принцип эквивалентности ускоряющейся инерциальной системы отсчета и гравитации, объединяющий действие сил инерции и действие потенциального гравитационного поля [26, 30—40]. Тем самым гравитация это всемирное притяжение тел пропорционально массе. В теории гравитации постулируется взаимосвязь действия пространства — времени от тензора кривизны. Нелинейный диссипативный процесс при движении частиц с излучением фотона при фазовом переходе с преодолением потенциального барьера. Угловую частоту вращения электрона будем рассматривать как собственную частоту колебаний частицы с полем как единого целого.

Приведенные выше теории близкодействия и дальнодействия заключаются в том, что всякое взаимодействие осуществляется посредством какого-то промежуточного звена (т.е. переносчика взаимодействия). Это характерно для электромагнитного взаимодействия с излучением кванта света (фотона). Теория дальнодействия (или теория действия на расстоянии), напротив, говорит о том, что всякое взаимодействие осуществляется мгновенно и через пустоту, т.е. действие со стороны любых тел может передаваться мгновенно на сколь угодно большие расстояния.

Главное отличие предлагаемой модели от теории относительности заключается в том, все частицы синхронны и подчиняются принципу квантовой суперпозиции как векторная сумма полей и частиц. Потенциальное поле имеет собственный момент количества движения. Количество движения потенциального поля вызывает соответствующе количество движения пробной частицы (или пробного тела), помещенной в это поле. Движение осуществляется в виде соленоидальной спирали по эквипотенциальной поверхности. По сути, силы сопротивления отсутствуют. В основе движения частиц лежит закон сохранения энергии.

Происхождение дисперсионных сил обусловлено взаимодействием атомов и молекул друг с другом за счет их дипольных моментов, собственных или взаимоиндуцированных. Дисперсионная энергия не имеет классического аналога и определяется квантово-механическими флуктуациями электронной плотности. Электронная плотность — вероятность обнаружения электрона в данной точке конфигурационного пространства. В данном случае флуктуация есть любое случайное отклонение какой-либо величины. В квантовой механике — отклонение от среднего значения случайной величины характеризует систему из большого числа хаотично взаимодействующих частиц; такие отклонения вызываются тепловым движением частиц или квантово-механическими эффектами. Инерциальная система движется прямолинейно и равномерно по криволинейной эквипотенциальной поверхности. Понятие силы исключает равномерное и прямолинейное движение. Такое движение предусматривает только движение с ускорением. Тогда движение без рассеяния энергии возможно только по эквипотенциальным поверхностям. Закон сохранения энергии утверждает, что энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь, она может лишь превращаться из одного вида в другой. Получение энергии из вакуума не представляется возможным, энергию вакуума не удается вычислить как собственное значение для гамильтониана вакуумного состояния [26—40], т.е. как источника энергии. Возникает нарушение закона сохранения энергии.

В основе фазовых переходов с ростом структур лежат перекрестные потоки тепла и вещества, с образованием вихревых планетарных структур [24—40].

Энергия сильного взаимодействия пропорциональна расстоянию между частицами, как при других взаимодействиях: электромагнитного типа, кулоновского, межмолекулярного, гравитационного.

Рост вихревых кристаллических структур

В диссипативных неравновесных системах потоки массы вещества вызывают перекрестные потоки тепла и наоборот [24, 25]. Кроме того, соотношения Л. Онзагера для перекрестных потоков разной природы, например, потоков тепла и частиц, соответствуют принципу взаимности, т.е. влияние потока тепла на поток вещества должно соответствовать влиянию потока вещества на поток тепла.

Гравитационное взаимодействие подобно межмолекулярному взаимодействию и образует планетарное строение солнечной системы. Рассмотрим подобие между вихревым планетарным строением последней и ростом вихревой кристаллических структур [20—22].

Все частицы, которые для простоты исследований изображают условно симметричными сферами, в реальном мире асимметричны и состоят из отдельных фрагментов.

Установлено, что сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть — родственные явления, определяемые фазовым переходом при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера).

Вихревые атмосферные потоки, возникающие как совокупность воздушных течений в

атмосфере над земной поверхностью, подобны вихревым явлениям. Причиной вихревых структур являются процессы диффузии частиц под влиянием перекрестных потоков тепла и вещества. Согласно принципу взаимности, влияние потока тепла на поток вещества должно соответствовать влиянию потока вещества на поток тепла [24]. Движение вещества соответствует принципу минимума диссипации энергии, поэтому потоки частиц перемещаются по энергетически выгодным поверхностям атмосферных структур. Тем самым происходит самоорганизация системы частиц в атмосфере, которая должна быть открытой по отношению к окружающей среде и стремится к неразрывности [24, 25].

На основе атомно-кластерной модели (АКМ) роста покрытий в вакууме изучена подвижность частиц на поверхности растущих покрытий под воздействием тепловых потоков [4—22]. Потоки тепла возникают от частиц осаждаемого вещества и тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося преимущественно по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия. В случае превышения тепловой энергии частиц потенциальных барьеров поверхности возможна поверхностная миграция (диффузия) частиц. В центре подложки плотность максимальна, по мере удаления на периферию плотность осаждаемого вещества уменьшается по закону косинуса. Поступающий от катода (испарителя вещества) поток частиц при осаждении сначала движется по поверхности подложки в потенциальном поле с градиентом плотности от центра на периферию. Осажденная частица вступает в равновесие с подложкой и с перекрестным излучением фотона переходит в состояние вихревого поля с круговым движением. В результате фазового перехода радиальное движение частиц сменяется на круговое движение с образованием вихревого потока вещества. Явление образования перекрестных потоков вещества разной природы (например, потоков тепла и частиц вещества) довольно распространено в природе. Например, это происходит при излучении фотонов атомами вещества [20—22]. Рассмотрим, например, реакцию превращения частиц $e^- + e^+ = 2\gamma$ в излучение (аннигиляцию) и излучение фотонов [20—22]. При соответствующих условиях возможно образование из фотона электрон-позитронной пары, и, наоборот, при слиянии электрона и позитрона образование в зависимости от направления спина частицы двух или трех фотонов, разлетающихся в противоположных направлениях или под углами 120° соответственно. Такая реакция взаимодействия электрон-позитронной пары приводит к возникновению двух (или трех) фотонов с энергией, равной энергии электрона и позитрона $e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$.

Предложенная АКМ роста связана с наличием на поверхности растущего покрытия двух фаз (конденсированной B_a и мигрирующей C_c) и возникающих вследствие этого нелинейных фазовых переходов в растущих слоях наносимых покрытий. Основным принципом модели является определение длины свободного пробега осаждаемых частиц l_0 по поверхности подложки:

$$l_0 = an^{1/2}, \tag{28}$$

где a — период решетки вещества;

n — число перескоков из одного адсорбционного центра в другой [8].

Потоки тепла определяют количество мигрирующей фазы, с ростом температуры увеличивается число мигрирующих частиц. Модель роста позволяет объяснить возникновение фазового перехода типа кристаллизации в диапазоне температур с формированием крупнокристаллического строения покрытий

$$L_n = A_в[(1 - \varepsilon_м)B_a + \varepsilon_м C_c]^{1/2}, \tag{29}$$

где B_a — количество конденсированной фазы;

C_c — количество мигрирующей фазы;

$A_в$ — параметр, зависящий от свойств наносимого вещества;

$\varepsilon_м$ — число частиц с энергией, превышающей потенциальный барьер поверхности U_b, $\varepsilon_м = D\int_{Ub}^{Ur}\left(\frac{dN}{dv}\right)dT$;

D — коэффициент пропорциональности;

U_r — энергия связи частицы с поверхностью.

Соотношением количества конденсированной B_a и мигрирующей C_c фаз выражается соотношением двух потоков вещества — скорости миграции и скорости роста монослоя.

Частицы на поверхности с энергией $U_b < E_T < U_r$ подчиняются максвелловскому распределению по скоростям dN/dv.

Формула (29) показывает, как частица из неподвижного равновесного состояния через фазовый переход приходит к другому равновесному состоянию движения с постоянной скоростью по поверхности растущего кристалла.

Неподвижная частица имеет собственный момент количества движения, который равен моменту количества движения потока поля среды, при этом частица находится в равновесии со средой. Нарушение равновесия происходит при возникновении возмущения среды, например,

с появлением возмущающей частицы. Асимметричное возмущение поля среды вызывает движение пробной частицы соответственно притяжению или отталкиванию поля возмущения. Во время движения происходит деформация пробной частицы с возникновением фазового перехода при критической величине характерного параметра (потенциального барьера). Фазовый переход приводит к перекрестному излучению фотонов в виде потоков тепла с передачей вихревого движения частиц растущего кристалла. В поверхностном слое частиц после фазового перехода в случае отсутствия конденсированной фазы сохраняется только мигрирующая фаза:

$$K_c = A_a(\varepsilon_м C)^{1/2}. \quad (30)$$

На поверхности покрытий (см. рис. 2, 4, 5) просматриваются вихревые образования как следствие вихревого движения перекрестных потоков осаждаемого вещества в процессе нанесения покрытия. Следовательно, причиной образования вихревых структур кристаллов при нанесении ионно-плазменных покрытий является фазовый переход от потенциального векторного поля в вихревое поле потоков осаждаемого вещества на поверхностях растущих ионно-плазменных покрытий [4—22]. Такой фазовый переход частицы из одного состояния в другое сопровождается вихревым перекрестным излучением фотонов с возникновением вихревого движения частиц.

Из проведенных экспериментов и теоретических исследований диссипативных систем следует наличие скрытых параметров (см. рис. 8—11), определяющих наряду с сильным близкодействием возникновение более слабого дальнодействующего. В основе вихревого движения лежит принцип суперпозиции, суть которого заключается наряду с путаным взаимодействием участием в общем взаимодействии с другими частицами [11, 12]. Неравенства Дж.С. Белла [41—43] справедливы для диссипативных статистических систем, в которых невозможно движение самих частиц со скоростью больше скорости света (требование принципа локальности). Рассмотрение частицы с дальнодействующим полем как единого целого с существованием принципа суперпозиции (уравнения (1—10)) позволяет применить наряду с близкодействием на больших расстояниях принцип дальнодействия как скрытые параметры (например, собственных колебаний частиц). Современная физика представляет теории близкодействия и дальнодействия внешне как альтернативные (либо-либо) теории. Теория близкодействия подразумевает передачу информации (сигналов) ближайшему окружению со скоростью света, что характерно для электромагнитного (кулоновского) взаимодействия с излучением кванта света (фотона). Скорость света является критерием подобия пространства-времени и зависит от плотности среды. Теория дальнодействия (или теория действия на расстоянии) в нашем случае подразумевает передачу информации с достаточно большой, но отличной от нуля скоростью, связанной с частотой колебания частиц. Для описания всего комплекса взаимодействий предлагается использование для частицы с полем как единого целого обе теории взаимодействия для описания систем достаточно большого количества частиц. Наличие дальнодействия и близкодействия обеспечивает возможность взаимосвязи всех частиц с полями Вселенной как единой системы в течение достаточно малого промежутка времени.

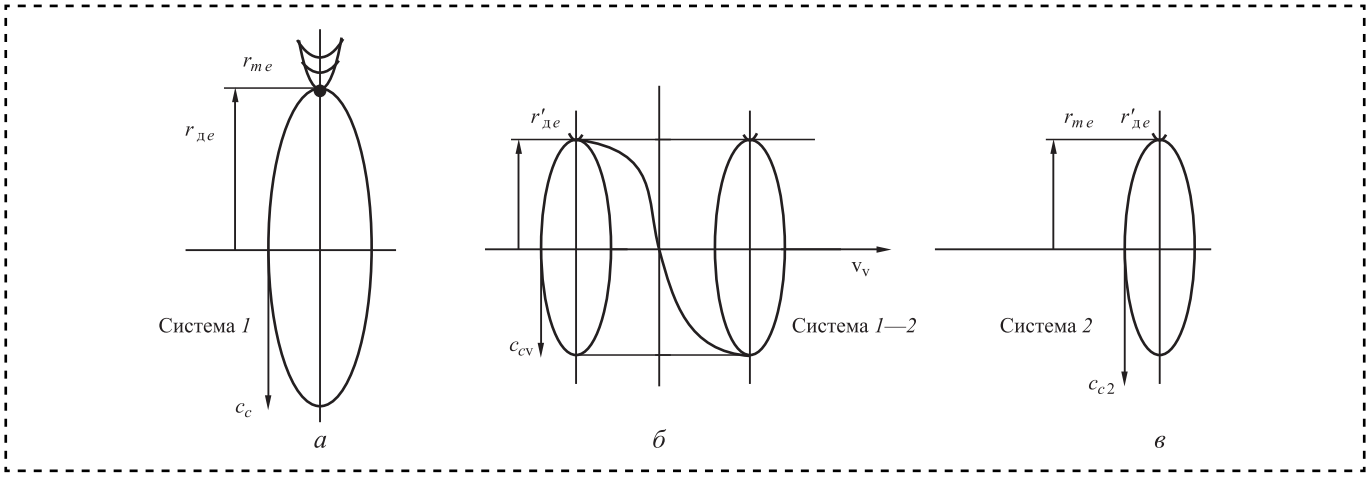


Рис. 11. Электрон (покоящийся в системе 0 при v = 0, плотности ρ_1) (*а*), движущийся электрон (*б*) (в системе 1 при скорости v_1, плотности среды ρ_{1-2}), покоящийся (*в*) (в системе 2 при v = 0, плотности среды ρ_2)

Постоянная тонкой структуры является критерием подобия системы частиц

$$\alpha = r_{me}/r_{де} = q^2/2\varepsilon_0 hc_0 = q^2\mu_0 c/2h. \qquad (31)$$

Обнаружено подобие явлений, в основе которых лежит вихревая природа частиц, из которых формируется периодическая система элементов. Частоту флуктуационных микроколебаний такой системы достаточно сложно измерить макроприборами.

Причина возникновения вихревого движения частиц — фазовый переход частицы из одного состояния в другое с перекрестным излучением фотонов. В природе не существует идеального прямолинейного движения, в реальном мире геометрия неевклидова. Реальная геометрия Солнечной системы и Земли является сферической. Поэтому в связи с отсутствием прямолинейной евклидовой геометрии на сфере потоки вещества (атомов или молекул воды, атмосферы) на земной поверхности совершают сложное вихревое движение по криволинейным линиям. Вихревые потоки, на первый взгляд, различных физических процессов тем не менее являются подобными.

Выводы

1. Причина возникновения вихревого движения — перекрестные потоки тепла и вещества, возникающие при фазовом переходе критической величины потенциального барьера.

2. Явление переноса потоков частиц без диссипации энергии вдоль эквипотенциальных поверхностей имеет квантово-механическую природу.

3. Сжатие тела при движении происходит поперек направления перемещения в виде спирали.

4. Скорость света c_0 является критерием подобия и зависит от плотности среды ρ_n.

5. Прямолинейное движение может быть только ускоренным и не может быть равномерным.

6. Обнаружено подобие явлений (сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост кристаллов в вакууме) и определены критерии подобия.

7. Все взаимодействия пропорциональны кривизне среды и расстоянию между телами.

8. Установлено, что сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть являются родственными явлениями, определяемыми фазовым переходом при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера).

9. Энергия сильного взаимодействия пропорциональна расстоянию между частицами, как при других взаимодействиях: электромагнитного типа кулоновского, межмолекулярного, гравитационного.

10. Постоянная тонкой структуры является критерием подобия строения частиц.

11. Неравенства Белла справедливы для диссипативных систем частиц с квантовыми свойствами, позволяющими создавать вихревые структуры.

12. Нанесение композиционных легированных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и возрастанию долговечности покрытия в несколько раз.

Библиографический список

1. **Булаевский Л.Н.** Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений // УФН. 1975. Т. 116. С. 449.

2. **Babaev E., Speight M.** Semi-meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors// Phys. Rev. B 72. 180502(R). 2005.

3. **Moshchalkov V., Menghini M., Nishio T.** Type-1.5 superconductivity // Phys. Rev. Lett. 102. 117001. 2009.

4. **Ноженков М.В.** О низком трении твердых тел // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 3. С. 459—466.

5. **Ноженков М.В.** Оборудование для нанесения износостойких антифрикционных композиций // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 8. С. 20—28.

6. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № 5. С. 100—112.

7. **Ноженков М.В.** Рост фрактальной структуры при нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 7. С. 11—28.

8. **Ноженков М.В.** Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность. № 1. 2014. С. 54—63.

9. **Nozhenkov M.V.** The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. 2013. V. 3. N 2. P. 73—90.

10. **Nozhenkov M.V.** Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. V. 14-A, Issue 2. P. 55—61.

11. **Ноженков М.В.** О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41—47.

12. **Ноженков М.В.** Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 38—48.

13. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 1. С. 22—33.

14. **Ноженков М.В.** Бездиссипативные потоки вещества в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 2. С. 20—31.

15. **Ноженков М.В.** Бездиссипативные потоки вещества в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 3. С. 14—17.

16. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на создание бездиссипативных потоков в конденсированных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 4. С. 16—32.

17. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № 5. С. 100—112.

18. **Ноженков М.В.** Рост фрактальной структуры при нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 7. С. 11—28.

19. **Ноженков М.В.** Возникновения потоков подобных частиц без диссипации энергии // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 12. С. 31—42.

20. **Ноженков М.В.** Потоки подобных частиц без диссипации энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5—6. С. 38—48.

21. **Ноженков М.В.** Квантовые потоки как вихревые сверхструктуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 3. С. 132—144.

22. **Ноженков М.В.** Вихревые потоки в диссипативных системах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 2. С. 77—91.

23. **Сосов Е.Н.** Геометрия Лобачевского и ее применение в специальной теории относительности. Казань: КФУ, 2016. 84 с.

24. **Куни Ф.М., Щекин А.К., Новожилова Т.Ю.** Соотношения взаимности Онзагера в неравновесной термодинамике // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2005. Сер. 4. Вып. 3. С. 125—129.

25. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.

26. **Эйнштейн А.** Теория относительности. Ижевск: НИЦ РХД, 2000. 224 с.

27. **Дирак П.А.М.** Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 4. С. 681—691.

28. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.

29. **Савельев И.В.** Курс общей физики. М.: Астрель, 2008. 336 с.

30. **Орир Дж.** Физика. М.: Мир, 1981. Т. 1—2.

31. **Фейнман Р.** Квантовая электродинамика. Новокузнецкий ФМИ, 1998. 216 с.

32. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1976. 440 с.

33. **Бьеркен Дж.Д., Дрелл С.Д.** Релятивистская квантовая теория. М.: Наука, 1978. Т. 1. 296 с.

34. **Каршенбойм С.Г.** Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. 2005. Т. 175. С. 271—298.

35. **Каршенбойм С.Г.** Прогресс в уточнении фундаментальных физических констант: рекомендованные значения КОДАТА 2010 // УФН. 2013. Т. 183. С. 935—968.

36. **Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.** Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981. 428 с.

37. **Борн М.** Таинственное число 137* // УФН. 1936. Т. XVI. Вып. 6. С. 697—729.

38. **Каплан И.Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. 312 с.

39. **Бараш Ю.С.** Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.

40. **Баргатин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н.** Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 6. 625 с.

41. **Bell J.S.** On the Einstein Podolsky Rosen Paradox // Physics.N 1, 3. 1964. P. 195—200.

42. **Einstein A., Podolsky B., Rosen N.** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 47 (10). P. 777—780.

43. **Холево А.С.** Статистическая структура квантовой теории. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 192 с.

ИНФОРМАЦИЯ

Указатель статей, опубликованных в 2018 году

№

Ресурс машин и конструкций

Королев А.В., Королев А.А., Балаев А.Ф. Модель прогнозирования ресурса деталей машин при многоцикловом нагружении 6

Технологичность конструкции

Волков Г.Ю., Смирнов В.В. Повышение надежности и снижение пульсации расхода планетарных роторных гидромашин с последовательно соединенными секциям 9

Волков Г.Ю., Смирнов В.В. Повышение производительности планетарных роторных гидромашин путем последовательной сборки однотипных секций . . .5

Дубовик Е.А. Модернизация цепного прижима для ремонта ведущего моста автомобилей ЗИЛ-4329 "Кентавр" 7

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. К разработке математической модели нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора механических трансмиссий 9

Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Сборка рециркулятора медицинского бактерицидного 7

Розинов А.Я., Вакулов П.С. Диагностика совершенствования технологии сборки судовых трубопроводов и монтажа в их составе сильфонных сдвиго-поворотных компенсаторов 7

Субханкулов Р.М., Игнатов А.В. Разработка классификации полимерных изделий переменного сечения 12

Сборочное оборудование и его элементы

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Степанов А.С. Обоснование параметров устройства и режимов движения ползунов для подачи резьбовых деталей в зону завинчивания многошпиндельного шпильковерта 4

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Степанов А.С. Обоснование параметров устройств и режимов движения поворотной платформы двухшпиндельного шпильковерта 2

Житников Ю.З., Пискунов В.В. Самодоориентация деталей, сопрягаемых по резьбовым поверхностям при роботизированной сборке 1

Кузнецова С.В. Управляемость и наблюдаемость системы автоматизированной сборки 4

Соколов В.А. Оценка точности прецизионных промышленных роботов в производствах микроэлектронных устройств авиационной и космической техники 6

Современные технологии сборки

Микаева С.А., Бойчук М.И. Сборка автономного комплекса хранения, приготовления и дозирования сорбента 6

Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Сборка соединений из разнородных материалов давлением импульсного магнитного поля 9

Технологическая оснастка для сборки

Емельянов С.Г., Кочергин В.С., Евсеев Е.Ю. Автоматизированный подход к проектированию протяжек для обработки гранных отверстий 5

№

Розинов А.Я., Бескровный А.Ю. Повышение эффективности механизации стапельной сборки путем конструктивно-технологического изменения схемы силового действия средств ее выполнения 12

Розинов А.Я., Бескровный А.Ю., Логунов В.В. Расширение области технологического применения средств сборки с электромагнитным креплением 10

Сборка с использованием клеев

Игнатов А.В., Герасимов Н.В. Методический подход к расчету прочностных характеристик металлополимерного соединения 12

Игнатов А.В., Островский Ю.А., Мозгин С.А. Автоматизация выбора анаэробной композиции при сборке изделий в дизельном двигателестроении 10

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Макаров А.М., Кухтик М.П., Мушкин О.В., Лапиков М.А. Повышение эффективности удержания гибкого контейнера при его наполнении сыпучим материалом 10

Руднева Л.Ю., Литвинчук А.В. Система управления и структуры математического обеспечения автоматизированных транспортно-складских систем машиностроительных производств 10

Сорокин М.Н. Решение трехпараметрической задачи комплектования частного вида 5, 9, 11

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Вашуков Ю.А., Синельников О.Р., Камалиева Р.Н. Исследование несущей способности изделий из композиционных материалов с отверстиями, полученными формованием 6

Вишневский Д.С., Ямников А.С. Влияние посадочных зазоров механизма закрывания заслонки на погрешность углового положения выходного звена 8

Головаш А.Н., Куршакова Н.Б. Анализ понятий и определений термина "качество" для использования в системе технического обслуживания и ремонта подвижного состава 7

Гоцеридзе Р.М., Лукин К.Б. Статическая балансировка поплавковых чувствительных элементов гироприборов 3

Гречников Ф.В., Яковишин А.С., Захаров О.В. Минимизация объема измерений плоских поверхностей деталей при сборке 2

Давыдов В.М., Стельмаков В.А., Шпорт В.И. Исследование факторов, влияющих на точность формы отверстий, полученных при чистовой фрезерной обработке 6

Железникова О.Е., Синицына Л.В., Микаева С.А. Сборка установки на основе интегрирующей сферы и спектрорадиометра для световых измерений . . .11

Захарченко Д.Б., Первухина Е.Л., Тимофеев И.С., Осипов К.Н. Перспективные ИТ-решения в задачах анализа и контроля испытаний двигателей внутреннего сгорания 3

Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов 2

№

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Афанасьева Ю.Д., Мигранов А.М. Многослойные покрытия системы Ti–TiN для режущего инструмента 9
Микаева С.А., Бойчук М.И. Сборка и устройство каплеотбойника 1
Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Изучение динамических свойств магнитоактивных эластомеров и разработка демпфирующих опор 1
Музафарова С.-В.Р., Котов С.А. Экспериментальный анализ причин эксплуатационных повреждений подшипников качения в газотурбинных двигателях 6
Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Макеев А.Б. Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя 7
Поляков С.А., Лычагин В.В., Кулешова Е.М. Оценка влияния смазочных материалов на ресурс червячных передач по критерию предельного износа . . .8
Потапов В.В. Методика нормирования герметичности и точности разъемных соединений систем безопасности контайнмента реактора 4
Сорокин М.Н., Лопатина А.С. Определение радиального зазора в шарикоподшипнике по его осевому зазору 7
Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В. Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе 1
Хорошевский М.Д., Полежаев Н.В., Матвеенко Д.С., Кристаль М.Г. Новые средства прецизионного измерения отверстий в корпусных деталях для селективной сборки 12

Разборка. Ремонт

Бых О.А., Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Соловьев Д.В., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Мусеев И.М. Опыт применения сварочного автомата "Прогресс-9" при ремонте парогенераторов атомных ледоколов 6
Дубовик Е.А. Технология разборки и сборки деталей с резьбовыми соединениями 4

Соединение деталей машин

Розинов А.Я., Бескровный А.Ю. Диагностика целесообразности комплексного применения средств технологического оснащения сборки при постройке корпусов судов 8

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И., Дюкин А.А. Сборка индустриального комплекса очистки воздуха от примесей 11

Трение и смазка в машинах и механизмах

Алисин В.В., Рощин М.Н. Исследование трибологических свойств композиционного материала ZX-530 в условиях смазки морской водой 10
Бардушкин В.В., Сычев А.П., Кочетыгов А.А., Карташов Д.А. Моделирование эксплуатационных упругих свойств капсулированных трибокомпозитов с учетом разброса значений относительных размеров микрокапсул 12
Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Мясников Ф.В., Кочетыгов А.А. Концентрация напряжений и деформаций в трибокомпозитах с наполненными жидкой смазкой сферическими микрокапсулами 3

№

Бородин А.В. Усовершенствование буксы грузового вагона с цилиндрическим роликоподшипником 1
Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д. Исследование структуры и антифрикционных свойств молибденсодержащего углеродного покрытия при граничной смазке 11
Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В. Сборный инструмент для волочения проволоки в режиме гидродинамического трения 4
Дунаев А.В., Павлов О.Г., Пустовой И.Ф., Рыжов В.Г. Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании серпентиновых геомодификаторов трения 9
Емаев И.И., Криони Н.К., Минасов Б.Ш., Шустер Л.Ш., Якупов Р.Р. Зависимость износа эндопротезов тазобедренного сустава от показателей адгезионного взаимодействия пары трения "головка—вкладыш" 9
Измайлов В.В. Влияние адгезионного взаимодействия на характеристики дискретного контакта технических поверхностей 3
Иргашев А.И., Иргашев Б.А. Оценка допустимой длины зубьев шестерен закрытых агрегатов при заданной износостойкости 3
Коднянко В.А. Статические характеристики вибронесущего газового подпятника 5
Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Разработка главных фрикционов с металлокерамическими дисками с новыми материалами трения в трансмиссиях гусеничных машин и математической модели нагружения фрикционного материала 11
Курапов П.А. Оценка трения в контакте шероховатых тел 11
Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Буслович Д.Г., Донцов Ю.В. Экструдируемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) 1
Панин С.В., Корниенко Л.А., Хуан Цитао, Алексенко В.О., Иванова Л.Р. Функционализация порошковых и волокнистых микронаполнителей для СВМПЭ обработкой в полиорганосилоксане 3
Петренко А.А. Параметры катастрофического изнашивания 3
Майба И.А., Глазунов Д.В. Способы регулирования коэффициента сцепления в контакте "колесо—рельс" 1
Меделяев И.А. Процессы в зоне контакта трибологических систем 2
Меделяев И.А. Физика абразивного изнашивания узлов трения технических систем 8
Меделяев И.А., Чмыхало А.И. Модель разрушения трубок теплообменных аппаратов с учетом сверхнормативной эксплуатации в условиях коррозионного воздействия 5
Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Оценка износостойкости режущего инструмента с покрытиями 11
Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Мухамадеев В.Р., Шехтман С.Р. Исследование износостойкости материалов и покрытий для металлорежущего инструмента 8
Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Нигматуллин Р.Г. Износостойкость узлов трения винтового компрессора 10
Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Минигалеев С.М., Мухамадеев И.Р. Исследование морфологических изменений наноструктурного трехкомпонентного покрытия TiAlN 3
Мигранов М.Ш., Фукс-Рабинович Г.С., Шустер Л.Ш., Мигранов А.М. Износостойкость порошковых инструментальных материалов 1

№

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М. Исследование многослойных композиционных покрытий для режущего инструмента 2
Ноженков М.В. Вихревые потоки в диссипативных системах 2
Пулатов Т.Р. Обоснование исходных параметров для проведения испытаний с торцовыми парами трения гидравлических машин и узлов 5
Сутягин О.В., Мешков В.В., Мединцев С.В. Влияние шероховатости взаимодействующих поверхностей и исходной толщины твердосмазочных покрытий на их долговечность 6
Чеботарев Е.А., Губарев П.В., Тептиков Н.Р., Игнатьев О.Л. Проблемы скоростного движения поездов на Северо-Кавказской железной дороге 10
Шишкарев М.П. Исследование адаптивной фрикционной муфты второго поколения с бифункциональным управляющим устройством 7
Шишкарев М.П. Повышение нагрузочной способности адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством 6
Шишкарев М.П. Повышение нагрузочной способности адаптивных фрикционных муфт 5
Шишкарев М.П. Совершенствование адаптивной фрикционной муфты первого поколения 12
Шмидт А.А. Исследование влияния шероховатости на возможность получения вытяжкой детали из высокопрочной стали 8
Эрлих Б.М. Методика изменения состояния гармонических колебаний 1
Эрлих Б.М. Применение общей процедуры параметрического и силового гашения фрикционных колебаний в системах с нелинейными силами 8
Эрлих Б.М. Процедуры для активного гашения колебаний в системах с нелинейными силами 6

В помощь конструктору, технологу

Байнева И.И. Компьютерное моделирование светодиодных ламп-ретрофитов 10
Березин С.Я. Групповые методы в анализе схем базирования крепежных резьбовых деталей при автоматической сборке 12
Буланов Э.А. Расчет прессового соединения 4
Буланов Э.А., Садовская Е.В. К расчетам на устойчивость 12
Водолазская Н.В. Расчет параметров определенных технических систем на основе моделирования их сборочных процессов 9

№

Гурьянов Г.Н., Платов С.И., Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Запрессовка рабочего вкладыша инструмента как способ повышения его прочности при волочении проволоки 2
Дубовик Е.А. Использование теплообменного прибора в гидравлических машинах 8
Емельянов С.Г., Селезнев Ю.Н., Губанов В.С., Кочергин В.С. Исследование влияния параметров протягивания на температуру рабочей зоны при обработке фасонных отверстий 4
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Необходимые и достаточные условия надежного закрепления узлов при сборке изделий в приспособлениях с резьбовыми прижимами 3
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросов А.Е., Золотарёва О.В. Режимы вращения бойка при испытаниях и штатной работе одношпиндельных гайковертов ударного действия 7
Звягинцев В.А., Дергунов Р.И. Разработка методики ассоциативного проектирования каркасов приспособлений для узловой и агрегатной сборки элементов конструкции планера самолета с использованием Siemens NX Product Template Studio 9
Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Компьютерное моделирование двухшпиндельного гайковерта для завинчивания шпилек 7
Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пневмоцилиндров в САПР КОМПАС-3D 1
Петров Н.В., Друзьянова В.П., Григорьев С.И., Старостин К.В. Верификация математической модели двигателя внутреннего сгорания, работающего на биогазовом топливе 9

Подготовка специалистов

Чечуга О.В. Испытания и технический контроль 11

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2017 году 1

Страницы истории

Березин С.Я. История развития самостопорящихся резьб 4
Попова Е.М., Попов В.Л. Роль аналогий и экзаптации в истории науки: от электростатики и теории гравитации к теории упругости, механике контактных взаимодействий и теории адгезии 11

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 13.11.2018. Подписано в печать 28.12.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.