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

2017 Том 18 / 1 (198)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Вайцехович С.М., Панов Д.В., Лебедев А.Н., Скрыльникова А.Г. Водо-водяные подогреватели с использованием спирально-профильных труб для индивидуальных тепловых пунктов . . . 3

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Привод управления заслонкой водометного движителя плавающей машины . . . 8

Руднева Л.Ю. Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных агрегатов и приборов, основанное на технологии сборки деталей по принципу равножесткости . . . 12

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Свойства задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал — втулка" . . . 16

Экология и безопасность сборочных работ

Гоцеридзе Р.М., Уразаев З.Ф. Технологический микроклимат сборочных цехов . . . 22

Трение и смазка в машинах и механизмах

Иванова Т.В., Петровых В.А., Налабордин Д.Г. Определение износа гребня колеса грузового вагона . . . 27

Полетаев В.А., Топоров А.В., Покровский А.А., Зарубин В.П. Разработка новых конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений . . . 30

Израилович М.Я., Эрлих Б.М., Рочагов А.В. Активное гашение фрикционных автоколебаний с учетом запаздывания виброгасящего воздействия . . . 34

В помощь конструктору, технологу

Разумов М.С., Гридин Д.С. Выбор технологической схемы сборки планетарного редуктора с шевронным зацеплением . . . 37

Технологическая оснастка для сборки

Шаломов В.И. Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков (ч. 2) . . . 40

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2016 году . . . 45

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98

E-mail: sborka@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

Ф.М. МИТЕНКОВ, *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

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. 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.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
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.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.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", 2017

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

2017 Vol. 18 **1 (198)**

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Vaytsehovich S.M., Panov D.V., Lebedev A.N., Skrylnikova A.G. Water-to-water heaters using spiral-profile for individual heater 3

Kryhtin Yu.I., Karlov V.I. Management drive by the shutter of water-jet propeller of floating machine 8

Rydneva L.Yu. Improving the performance of high-precision components and devices, based on the technology of assembling parts on the principle of equal rigidity 12

Feeding of assembly lines. Packaging arrangement. Stocking. Packing

Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Properties of a matching problem at selective assembling of “shaft—plug” products 16

Ecology and safety in assembly

Gotseridze R.M., Urazaev Z.F. Abstract of tilted assembly slop process microclimate 22

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Ivanova T.V., Petrovykh V.A., Nalabordin D.G. Determination of wear of a wheel flange of the freight car 27

Poletaev V.A., Toporov A.V., Pokrovskiy A.A., Zarubin V.P. Development of new construction of combinedmagnetic liquid gasket 30

Izrailovich M.Ya., Erlich B.M., Rochagov A.V. Active extinguishing of frictional self oscillations with taking in account of vibroproof influence delay 34

Industrial and design engineer’s aid

Razumov M.S., Gridin D.S. Selection process scheme assembly planetary gear with chevron engagement 37

Technological equipment for assembly

Shalomov V.I. Research of influence of design features of gas bearings on operational characteristics of spindle assemblies of machine tools (p. 2). 40

Information

Index of articles published in 2016. 45

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.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
F.M. MITENKOV

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

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
V.G. KARABAN'
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
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OMSK
V.N. KOSTYUKOV
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
V.I. KOLESNIKOV
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
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA
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", 2017

УДК 621.774.35+621.184.64

С.М. Вайцехович, *канд. техн. наук,* **Д.В. Панов,** *канд. юрид. наук,*
А.Н. Лебедев, *чл.-кор. РЭА,* **А.Г. Скрыльникова** *(НПО "Техномаш")*
E-mail: info@tmnpo.ru

Водо-водяные подогреватели с использованием спирально-профильных труб для индивидуальных тепловых пунктов

Рассмотрен вопрос модернизации секционных кожухотрубных водо-водяных подогревателей спирально-профильными теплообменными трубами с пассивными интенсификаторами теплоотдачи.

Considered the issue of modernization of the sectional shell-and-tube water-to-water heaters spiral-profile tube (SPT), TEP-main tube of new generation — passive intensifiers of heat transfer.

Ключевые слова: спирально-профильная труба, интенсификатор, теплообмен, гидравлическое сопротивление, течение вязкой жидкости, подогреватель.

Keywords: spiral-profile tube (SPT), an intensifier, heat transfer, hydraulic resistance, flow of a viscous fluid, heater.

Водо-водяные теплообменники, предназначенные для жилых и административных зданий, сооружений индивидуальной застройки, а также морских надводных и подводных судов, применительно к оборудованию ракетно-космической техники (РКТ), представляют собой горизонтальный или вертикальный аппарат жесткой конструкции, основным узлом которого являются корпус с трубным пучком и камера (секция) для воды (рис. 1).

Конструктивно секция (рис. 2) выполнена в виде сосуда, к торцам камеры приварены трубные решетки, внутри которых установлены профилированные трубки (рис. 3), по которым передается жидкая среда (мазут, вода). Трубный пучок состоит из прямых обкатных трубок, концы которых развальцованы или приварены в трубных досках (рис. 4).

В боковой поверхности камеры, с противоположных сторон, выполнены два отвода (см. рис. 1): один — для входа в межтрубное пространство камеры (стрелка *В*), предварительно нагретой в паровом котле жидкой среды, другой — для выхода этой среды из камеры теплообменника (стрелка *Г*).

Схема движения теплоносителя — противоточная (см. рис. 1). Теплоноситель — греющая жидкая среда — поступает в корпус (стрелка *В*), омывает наружную поверхность трубок, отдавая нагреваемой внутри трубок жидкой среде (для бойлерной — воду) теплоту, и отводится из

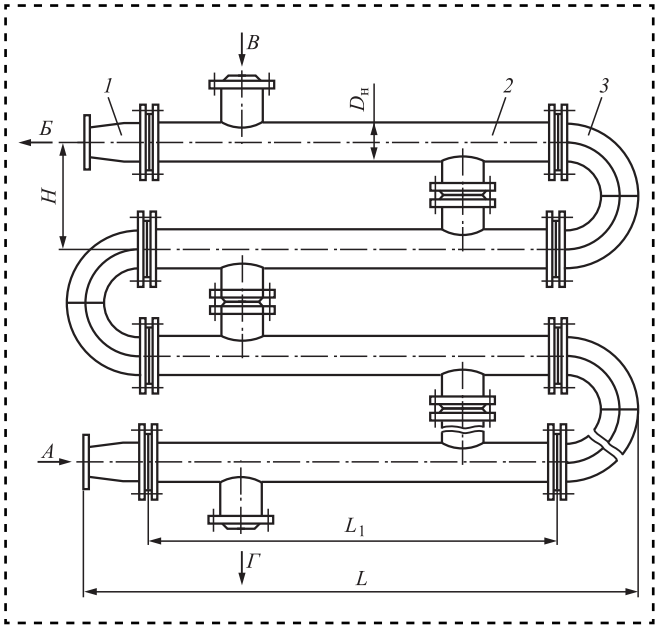

Рис. 1. Подогреватель 4-секционный — ПВ 168×2-1,0-РГ-4-У3:

1 — переходник; *2* — секция корпуса; *3* — калач; *А* — вход рабочей нагреваемой среды; *Б* — выход рабочей нагреваемой среды; *В* — вход теплоносителя; *Г* — выход теплоносителя

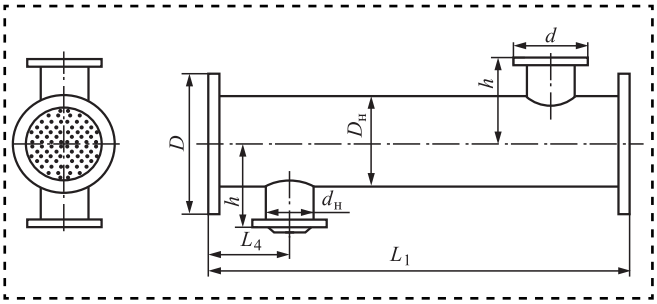

Рис. 2. Секция сварная типов СГ и СП:
D_n — наружный диаметр секции; L_1 — длина секции

корпуса. Нагреваемая жидкая среда, проходя по трубному пучку, уходит к потребителю. Трубные пучки изготавливают из черных, коррозионностойких, жаропрочных и цветных материалов.

Для повышения эффективности водо-водяных подогревателей (ВВП) необходимо решить две задачи:

- увеличение теплоотдачи в межтрубном и внутритрубном каналах за счет интенсификации теплообменных поверхностей;
- выравнивание коэффициентов теплоотдачи с двух сторон, что обеспечит наибольший коэффициент теплопередачи.

Наиболее широко в бойлерных станциях применяют секции теплообменников, состоящих из профилированных методом накатки латунных трубок (ЛО-70-1, Л-68), диаметром от 16 мм (см. рис. 3, *б*), толщиной стенки от 1 мм, с теплообменной поверхностью 0,094 м^2, гидравлическим сопротивлением 0,008 МПа и тепловым потоком 2,54 кВт (ГОСТ 27590—2005).

Секция теплообменника состоит из корпуса и теплообменных труб, вваренных в трубную доску. Трубную доску вместе с пучком труб (см. рис. 4) закрепляют внутри корпуса, который с одной стороны закрыт переходником, с другой — контактирует с калачом (коленом).

Самый простой и экономичный вариант перевооружения тепловых бойлерных состоит в замене при ремонте существующих ВВП профилированных накаткой труб на трубы спирально-профильные (СПТ) при сохранении остальных конструктивных элементов (кожухотрубной секции, трубной доски, стандартных калачей и переходников) без изменения (рис. 5) [2], что позволит без особых затрат либо повысить в 1,56...2 раза теплопередачу подогревателей, либо уменьшить во столько же раз площади. Затраты на накатку гладких труб при этом соизмеримы на профилирование СПТ, а разница в цене закупки гладких труб (∅16×1×2000 мм на ∅20×0,8×2000 мм) составляет не более 220...250 руб. за одну трубу.

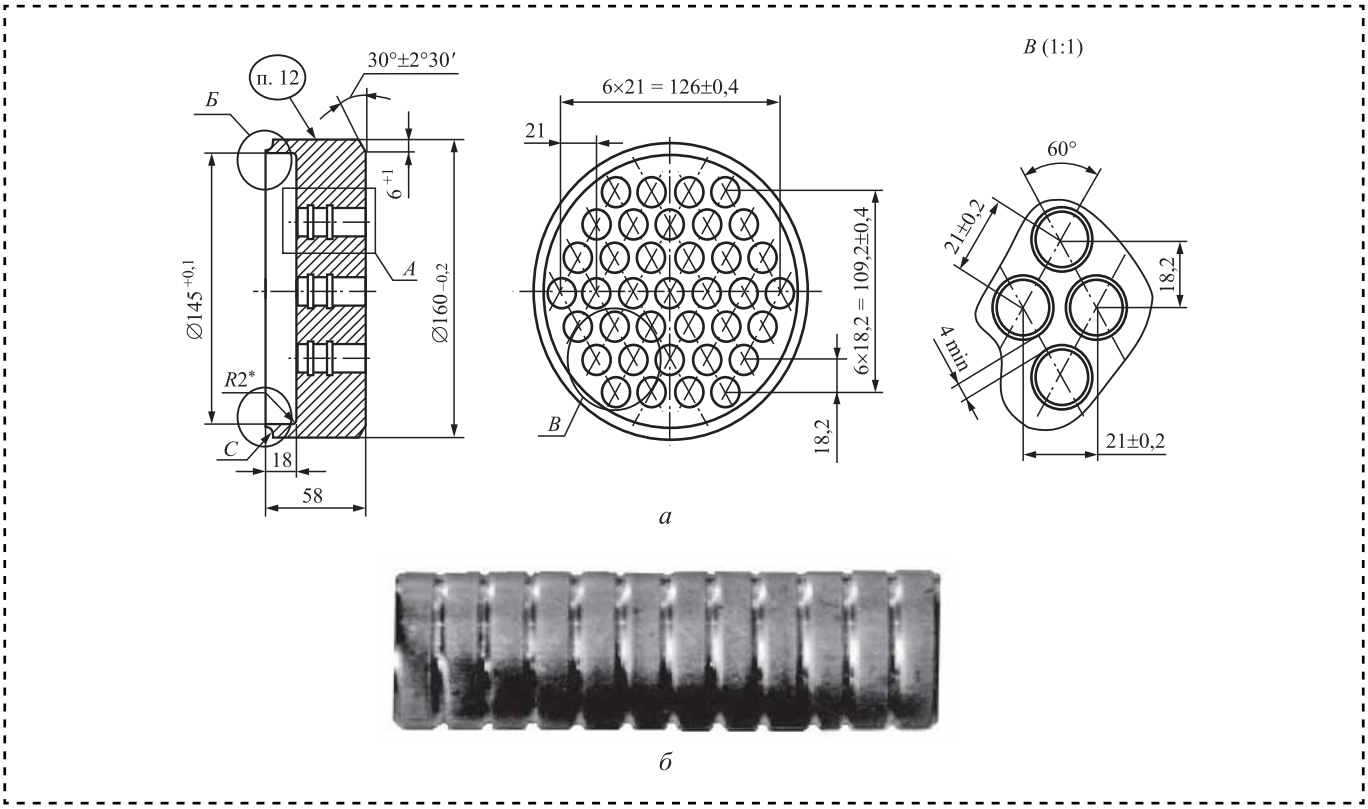

Рис. 3. Стандартная трубная доска (*а*) и профилированная трубка, полученная методом накатки (*б*) для подогревателя — ПВ 168 × 2-1,0-РГ-4-У3 ГОСТ 27590—2005

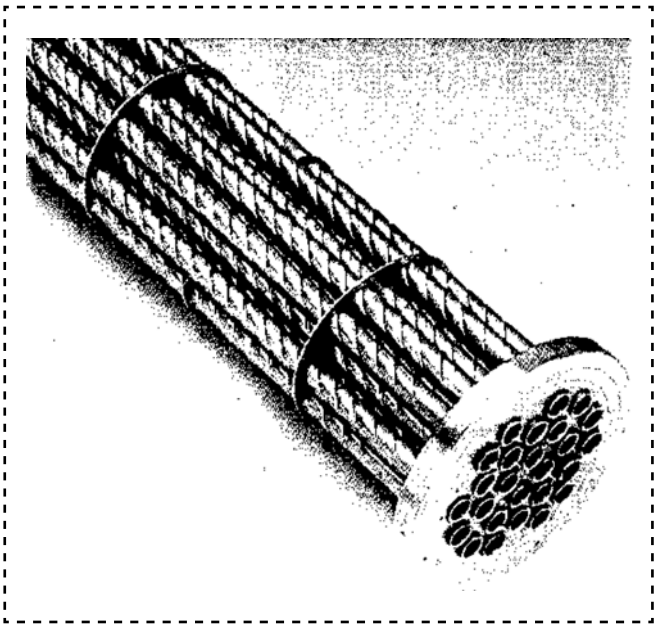

Рис. 4. Трубная доска с пучком из накатных труб, применяемых в современных бойлерных агрегатах

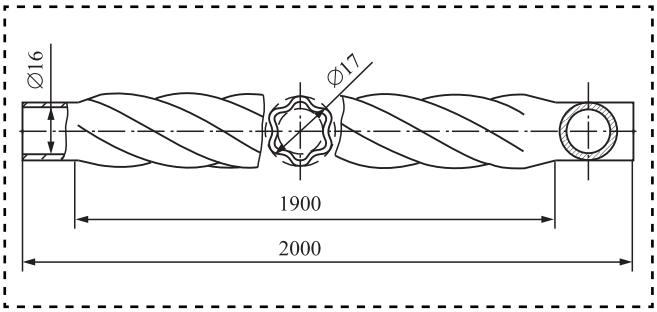

Рис. 5. Шестизаходная СПТ с круглыми законцовками

Изготовляют СПТ на прокатно-волочильном стане с технологической оснасткой [3, 4], способной выполнить требуемый симметричный профиль СПТ (шестизаходной $СПТ_S$ с симметричным профилем) [1].

Шестизаходная труба диаметром 16 мм (см. рис. 5) имеет гидравлическое сопротивление на 12,5 % больше, чем у соответствующей профилированной накаткой трубы (см. рис. 3), но по теплофизическим испытаниям [5] организует теплоотдачу в 1,56 раза выше [6, 7].

При сравнительном анализе за аналог принимали стандартный подогреватель ПВ 168×2-1,0-РГ-4-У3 (ГОСТ 27590—2005); длина труб — L = = 2000 мм; наружный диаметр и толщина гладких труб — 16 × 1 мм; внутренний диаметр, ограничивающий межтрубное пространство, — 150 мм; длина секции — 2 м; условное давление рабочей среды — 1,0 МПа; тип секции — РГ (разъемный, без компенсатора теплового расширения); вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69 — У3; материал труб — латунь. Подогреватель состоит из четырех секций типов СГ и СП, калачей и переходов.

Геометрические и теплофизические параметры секции подогревателя ПВ 168×2-1,0-РГ-4-У3 по ГОСТ 27590—2005:

Число секций, шт.. 4
Исходная трубная заготовка, мм. . . . . Ø16×1×2000
Масса одной трубки, кг 0,82
Площадь поверхности нагрева одной трубки, м^2. 0,094
Гидравлическое сопротивление в трубной системе, МПа 0,008
Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве, МПа 0,007
Тепловой поток в секции, кВт 93,9
Площадь проходного сечения трубного пространства, м^2. . . . . $9{,}39\cdot10^{-3}$
Площадь проходного сечения межтрубного пространства, м^2 . . . . . $10{,}232\cdot10^{-3}$

Модернизация секции подогревателя обусловлена заменой накатных профильных труб на СПТ класса $СПТ_S$ [1].

Идентифицируют СПТ-подогреватель из множества числа профильных труб по специфическим параметрам: геометрическим (число гофров) и тепловым (площадь теплообменной поверхности):

СПТ-подогреватель — 17/20×0,8×6-2,12- 30×2000 (ПВ 168×2 $СПТ_S$) состоит из четырех секций, а по набору внешних атрибутов (корпус секции, калачи, переходы) аналогичен подогревателю ПВ 168×2 — ГОСТ 27590—2005.

Геометрические и теплофизические параметры СПТ — 17/20 × 0,8 × 6-2,12-30 × 2000:

Число секций, шт.. 4
Исходная трубная заготовка, мм . . . . . Ø20×0,8×2000
Масса одной трубки СПТ, кг 1,02
Наружный диаметр исходной трубной заготовки до профилирования, мм. 20
Наружный диаметр описанной окружности СПТ, мм 17
Толщина стенки, мм. 0,8
Число "заходности" СПТ (число гофров), шт. 6
Площадь поверхности нагрева одной трубки СПТ, м^2. 0,126
Гидравлическое сопротивление в трубной системе, МПа 0,009
Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве, МПа 0,007
Тепловой поток в секции, кВт 154,8
Угол закрутки (подъем винтовой линии), ° 30
Расход нагреваемой воды, м^3/ч . . . . . 8...12
Расход греющей воды, м^3/ч . . . . . 16...24
Давление в сети, МПа . . . . . 1,0...1,2

Из сравнения геометрических и теплофизических параметров СПТ-подогревателя и подогревателя, выполненного по ГОСТ 27590—2005, видно, что:

— площадь поверхности нагрева у СПТ-трубки в 1,34 раза больше;

— тепловой поток секции у СПТ-подогревателя в 1,65 раза больше;

— отношение площадей проходного сечения трубного и межтрубного пространств у СПТ-подогревателя больше на 11 %;

— путь прохождения подогреваемой воды у секции СПТ-подогревателя больше на 10 %;

— коэффициент теплопередачи у СПТ-подогревателя на 50...100 % больше.

СПТ-подогреватель в системе горячего водоснабжения работает методом противотока:

— холодная водопроводная вода поступает через патрубок в трубное пространство нижней секции и выходит через патрубок верхней секции;

— греющая вода входит в патрубок верхней секции и, двигаясь противотоком к нагреваемой воде, проходит последовательно межтрубное пространство всех секций и выходит через патрубок нижней секции.

Перспективные сферы применения СПТ для теплообмена и разделения фаз:

1) горизонтальные секционные водо-водяные и пароводяные подогреватели в системах отопления и горячего водоснабжения ЖКХ (ЦТП и ИТП);

2) паровые и водогрейные котельные;

3) оборудование для ТЭЦ, бойлеры сетевой воды, конденсаторы пара;

4) конвективные поверхности теплообмена котельных установок;

5) утилизаторы тепла газопоршневых и газотурбинных когенерационных установок;

6) подогреватели нефти и мазута, маслоохладители на ламинарных потоках;

7) теплообменники химической и нефтехимической промышленности;

8) технологические теплообменные и холодильные аппараты пищевой промышленности;

9) испарители и конденсаторы кожухотрубных холодильных установок и систем кондиционирования воздуха;

10) парогенераторы и подогреватели реакционного газа типа "труба в трубе";

11) вихревые газохимические реакторы нового поколения;

12) аппараты стабилизации скважинного газа;

13) очистка от примесей и сепарация газов, осушка сжатого воздуха.

Разделение сред различной плотности в движущемся потоке основано на эффекте центробежного силового поля. Влажный воздух, двухфазная система или загрязненный газ в такой трубе движутся со скоростью по спирали. Центробежная составляющая инерционной силы вытесняет более тяжелые частицы воды и примесей к поверхности трубы. В выходящем потоке очищенная срединная часть отделяется от периферийной, содержащей примеси и влагу, обеспечивая эффективность сепарации 98...99 %.

При определенной геометрии СПТ и скорости потока достигается вихревой эффект "шнурования", когда тяжелая фаза сосредоточена в центральной части потока, что позволяет ее эффективно выделять и выводить, не касаясь стенок канала.

Для производства теплообменных аппаратов с СПТ в первую очередь необходимо изготовить оборудование (прокатно-волочильный стан) и применительно к нему разработать технологию получения СПТ из круглых гладкостенных труб-заготовок. Производительность прокатно-волочильного стана должна составлять не менее 300 000 погонных метров СПТ в год.

После выхода прокатно-волочильного стана на заданную производительность затраты на изготовление СПТ сопоставимы с затратами на производство методом накатки профилиро-

ванных труб, используемых в настоящее время в ВВП по ГОСТ 27590—2005.

Выводы

СПТ наиболее эффективны, поскольку рост эффективности теплоотдачи у них не сопровождается повышенным ростом гидравлического сопротивления.

Теплообменные аппараты, изготовленные на основе применения СПТ, значительно эффективнее теплообменников с любыми иными трубами, их развитие возможно по нескольким направлениям:

— создание теплообменников, имеющих в 2—3 раза большую теплопроизводительность при тех же массогабаритных характеристиках;

— создание теплообменников, имеющих такую же теплопроизводительность при массе и габаритах в 2—3 раза меньше, чем у теплообменников с применением цилиндрических труб и в 1,56 раз выше, чем у труб, профилированных накаткой;

— модернизация существующих теплообменников (например, водоподогревателей, котлов) с заменой цилиндрических труб на спирально-профильные для увеличения их теплопроизводительности.

Библиографический список

1. **Вайцехович С.М., Кривенко Г.Г., Корнилов В.А.** Спирально-профильные трубы: преимущества и перспективы применения в теплообменных аппаратах // Технология машиностроения. 2011. № 12. С. 31—37.
2. **Вайцехович С.М., Бараев А.В., Кривенко Г.Г., Красуля А.А.** Теплообменные элементы нового поколения для систем терморегулирования РКТ // Новые технологии. Т. 2: Матер. X Всерос. конф. М.: РАН, 2013. 199 с.
3. **Пат.** 2 225 766 RU, МКИ^7 B 21 D 15/04. Способ изготовления труб с винтовыми гофрами / А.А. Мишулин, С.М. Вайцехович. № 2003112641/02, заяв. 30.04.2003; опубл. 30.03.2004.
4. **Пат.** 2 329 110 RU, МКИ^7 B 21 D 15/04. Способ изготовления спирально-профильных труб / С.М. Вайцехович, А.Н. Лебедев др. № 2006128633/02, заяв. 08.08.2006; опубл. 20.07.2008.
5. **Мишулин А.А., Вайцехович С.М., Сдасюк В.В.** Исследование и подбор оптимальных параметров теплообменных профильных труб для теплообменных аппаратов. Отчет НПО "ЦНИИТмаш" с НПК "Вектор" от 20.03.2002.
6. **Энергосбережение** в энерготехнике и коммунальном хозяйстве / В.Н. Лебедев и др. // Рациональное природопользование: ресурсо- и энергосберегающие технологии и их метрологическое обеспечение. Петрозаводск. 2004. С. 100—105.
7. **Пат.** 2 386 096 RU, МКИ^7 F 28 F 1/00. Способ изготовления спирально-профильных труб / С.М. Вайцехович, А.Н. Лебедев, С.А. Лебедев. № 2008113822/06, заяв. 11.04.2008; опубл. 10.04.2010.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 629. 114.2-235

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

Привод управления заслонкой водометного движителя плавающей машины

Представлены пути совмещения гидравлического привода в механизме управления заслонкой водометного движителя с механическим приводом управления на суше для плавающей гусеничной машины.

Конструкция совмещенного привода управления заслонок не требует отдельных рычагов управления, упрощает сборку узлов, удобно компонуется в машине, имеет меньшую массу по сравнению с конструкциями существующих механических приводов, гидравлическое сервирование, что снижает силы на органах управления заслонками водометных движителей.

The presented material is sanctified to the search of ways of combination of hydraulic drive in the mechanism of management by the shutter of water-jet propeller with the mechanical drive of management on land for a floating caterpillar machine.

The construction of the combined drive of management of shutters does not require the separate levers of management, simplifies assembling of knots, comfortably arranged in a machine, has less weight as compared to the constructions of existent mechanical drives, has the hydraulic serving, that reduces efforts on the organs of management by the shutters of water-jet propellers.

Ключевые слова: водометный движитель, заслонка, привод управления, гидроцилиндр, золотник.

Keywords: water-jet propeller, shutter, a management drive, hydrocylinder, slide-valve.

Предлагаемое техническое решение используют в качестве привода управления заслонкой водометного движителя транспортных плавающих гусеничных и колесных машин (рис. 1).

В настоящее время большое внимание уделяют упрощению конструкции приводов управления и компоновки отделения управления плавающих гусеничных и колесных машин, в которых помимо сухопутного движителя имеется движитель для плава и соответствующие приводы управления [1] (рис. 2).

Для поворота на плаву и закрывания водометных движителей машины при перемещении по суше в плавающих машинах (например, танке ПТ-76) используют на каждом борту поворачивающиеся вокруг оси заслонки водометных движителей. Управление заслонкой водометного движителя выполняется отдельными, независимыми от привода управления поворотом машины на суше, механическими приводами — для правого и левого борта.

Механический привод управления заслонкой танка ПТ-76, аналогично приводу управления машиной на суше, состоит из рычагов управления заслонками, промежуточных мостиков, рычагов, валиков, соединительных тяг. При расположении трансмиссии и водометных движителей в корме машины, рычагов управления в носовой части машины, трассу управления заслонками выполняют вдоль всей машины [2]. Привод управления заслонкой может быть тросовым (рис. 3).

Недостаток механического привода управления заслонкой водометного движителя танка ПТ-76 — наличие отдельного рычага управления заслонкой для поворота машины на плаву на каждом борту, что увеличивает число органов управления машиной, усложняет компоновку приводов управления и отделения управления машины, увеличивает массу машины. Кроме того, управление заслонкой механическим приводом без сервирования требует приложения значительных усилий на органы управления. Силы на рычаге управления закрыванием на суше водометной заслонки плавающей гусеничной машины массой 7...8 т составляют 68,6...88,3 Н.

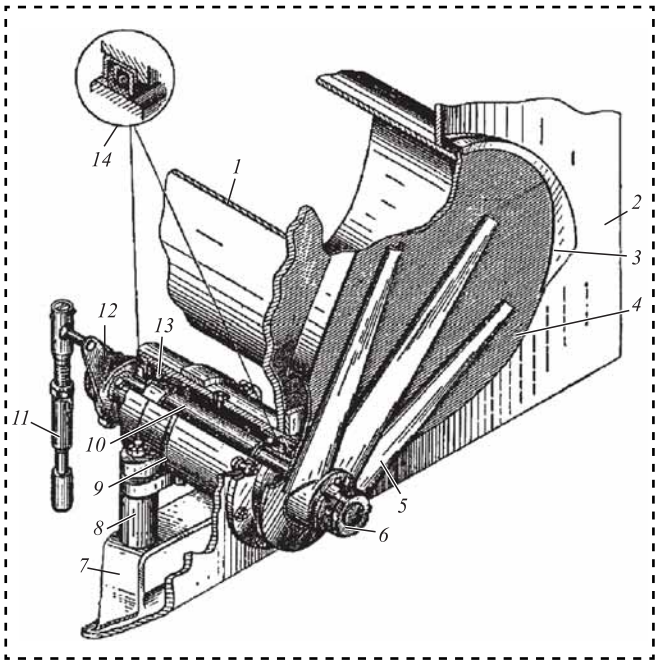

Рис. 1. Заслонка водометного движителя:
1 — кормовой патрубок; *2* — кормовой вертикальный лист; *3* — козырек заслонки; *4* — заслонка; *5* — ребро жесткости; *6* — гайка с контргайкой; *7* — кронштейн; *8* — бонка; *9* — бугель; *10* — валик заслонки; *11* — тяга; *12* — рычаг валика заслонки; *13* — радиально-упорный шарикоподшипник; *14* — самоподжимные сальники

Цель технического решения — уменьшение числа органов управления машиной, упрощение компоновки привода управления заслонкой и отделения управления машины, снижение массы и силы на органах управления заслонками машины.

Для достижения поставленной цели заслонки водометного движителя связывают с приводом управления механизмом поворота машины. Эта связь обеспечивается применением гидропривода управления заслонкой, состоящего из задающего золотника и гидроусилителя с жесткой обратной связью по перемещению задающего золотника. Оси гидроусилителя и задающего золотника расположены параллельно. Задающий золотник соединен поршнем силового цилиндра с заслонкой, а задающим элементом — с приводом управления поворотом машины. Гидропривод также снабжен золотником управления, занимающего принудительно и независимо от гидроусилителя крайние положения таким образом, что в зависимости от его положения заслонка может соответственно находиться в закрытом или открытом положении. При закрытом положении любое перемещение рычага управления поворотом машины не влияет на положе-

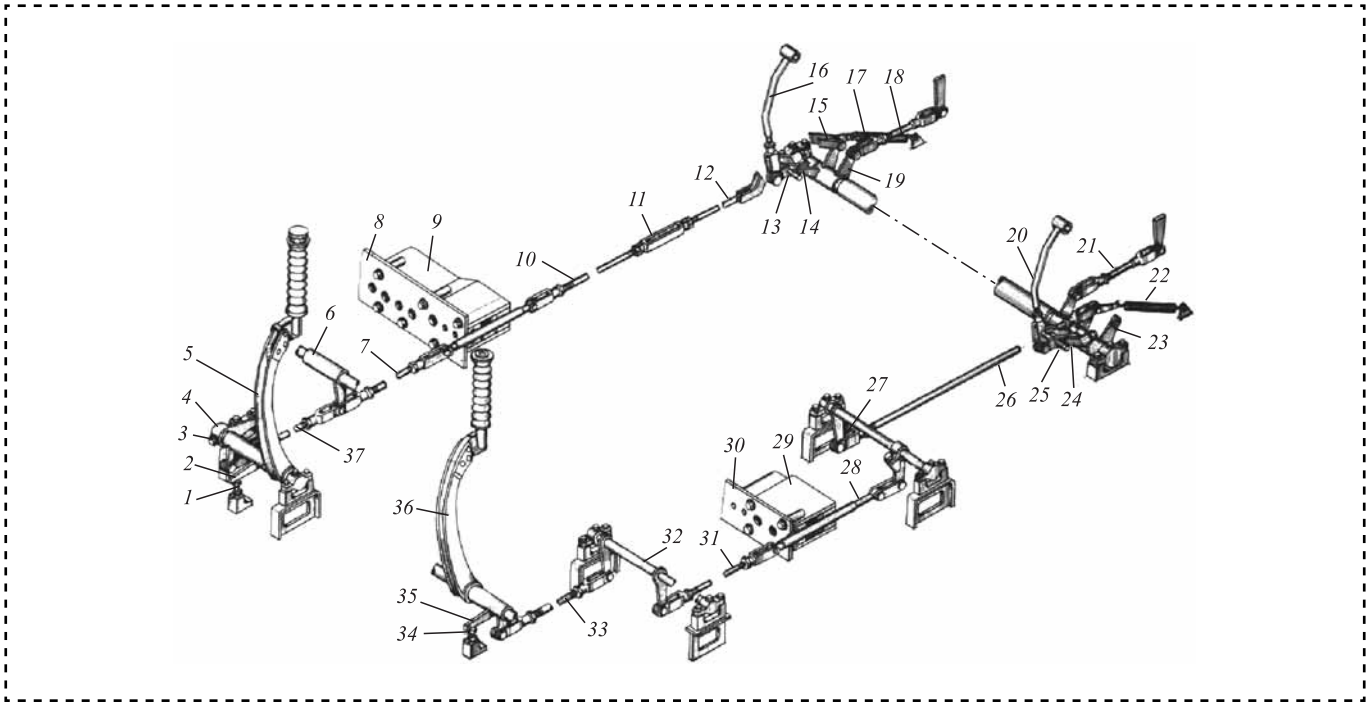

Рис. 2. Привод управления на суше для плавающей машины:
1, *34* — регулировочные болты; *2*, *6*, *14*, *19*, *23*, *24*, *35* — рычаги; *3* — болт; *4* — хомут; *5*, *36* — рычаги управления; *7*, *10*, *12*, *26*, *28*, *31*, *33*, *37* — тяги; *8*, *30* — щитки; *9*, *29* — поводковые коробки; *11* — стяжная муфта; *13*, *25* — штифты; *15* — серьга; *16*, *20* — тяги ленточного тормоза; *17*, *22* — пружины; *18*, *21* — тяги бортового фрикциона; *27*, *32* — валики

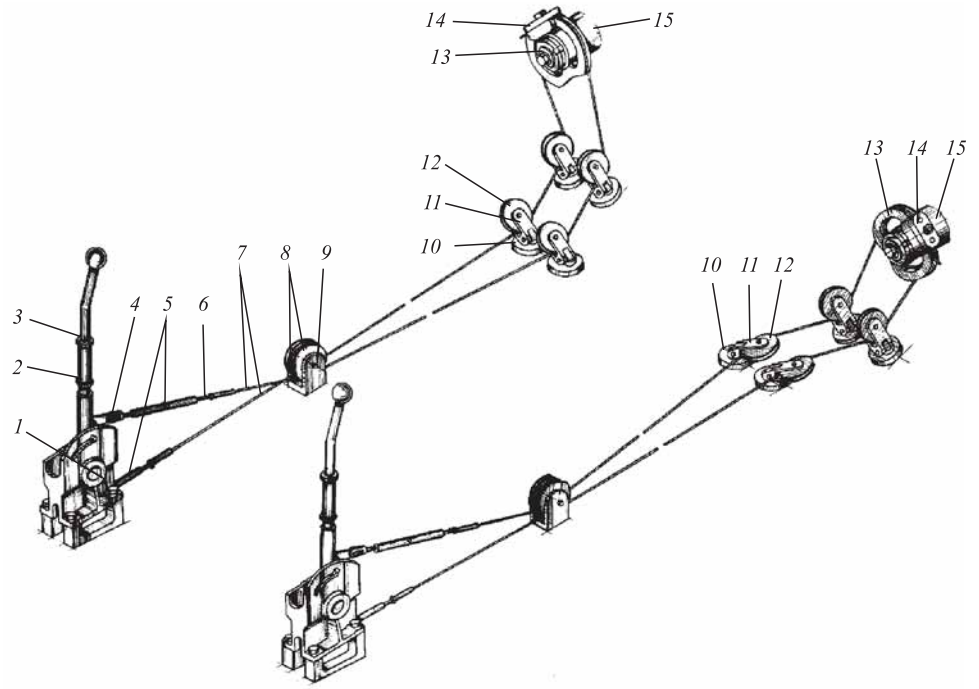

Рис. 3. Тросовый привод управления заслонкой для плавающей машины:
1 — кронштейн; *2* — подвижная втулка: *3* — рычаг управления; *4* — втулка; *5* — стяжная муфта; *6* — резьбовая тяга; *7* — трос; *8*, *10*, *12*, *13* — ролики; *9*, *11*, *14* — кронштейны; *15* — валик

ние заслонки, а при открытом положении перемещение рычага управления поворотом машины вызывает пропорциональный поворот заслонки (рис. 4).

Гидропривод управления заслонкой водометного движителя состоит из: корпуса гидроусилителя *1*, поршня *2*, соединенного шарнирно с одной стороны с элементом привода к заслонке *3*, а с другой — с задающим золотником *4* через коромысло *5* и серьгу *6*. Коромысло *5* шарнирно связано с элементами привода управления поворотом машины на суше *7*. Оси поршня *2* и задающего золотника *4* расположены параллельно. В корпус гидроусилителя *1* встроен золотник управления *8*, который принудительно может занимать крайние положения, например, одно положение при включении в коробке перемены передач привода к водометным движителям, а другое — при его выключении. В данной конструкции золотник управления *8* включается гидравлически. Для принудительного перемещения золотника управления *8* служит двухпозиционный золотниковый распределитель *9*. Весь гидропривод управления заслонками располагается в кормовом моторно-трансмиссионном отделении машины рядом с элементами привода управления поворотом машины на суше [3].

Предлагаемый привод управления заслонками водометного движителя работает следующим образом. Когда привод находится в положении, соответствующем движению машины на суше (см. рис. 4, *а*), т.е. двухпозиционный золотниковый переключатель *9* подает рабочую жидкость в левую полость золотника управления гидроусилителем *8*, а правую соединяет со сливом, золотник *8* находится в крайнем правом положении, а рабочая жидкость из напорной магистрали через полости в корпусе *1*, проточки в золотнике *8* поступает в правую полость цилиндра, а левая — соединяется со сливом, и поршень *2* находится в крайнем левом положении, что соответствует положению полностью закрытой заслонки. В этом случае перемещение элементов привода управления поворотом машины *7* (может совершаться только вправо) вызовет прокачивание коромысла *5* вокруг шарнира поршня *2* и перемещение задающего золотника *4* через серьгу *6*. Золотник *8*, поршень *2* остаются при этом на месте, т.е. неподвижными.

Когда двухпозиционный золотниковый переключатель *9* подаст рабочую жидкость в правую полость золотника *8*, а левую соединит со сливом, золотник *8* переместится в левое крайнее положение и соединит правую полость цилиндра

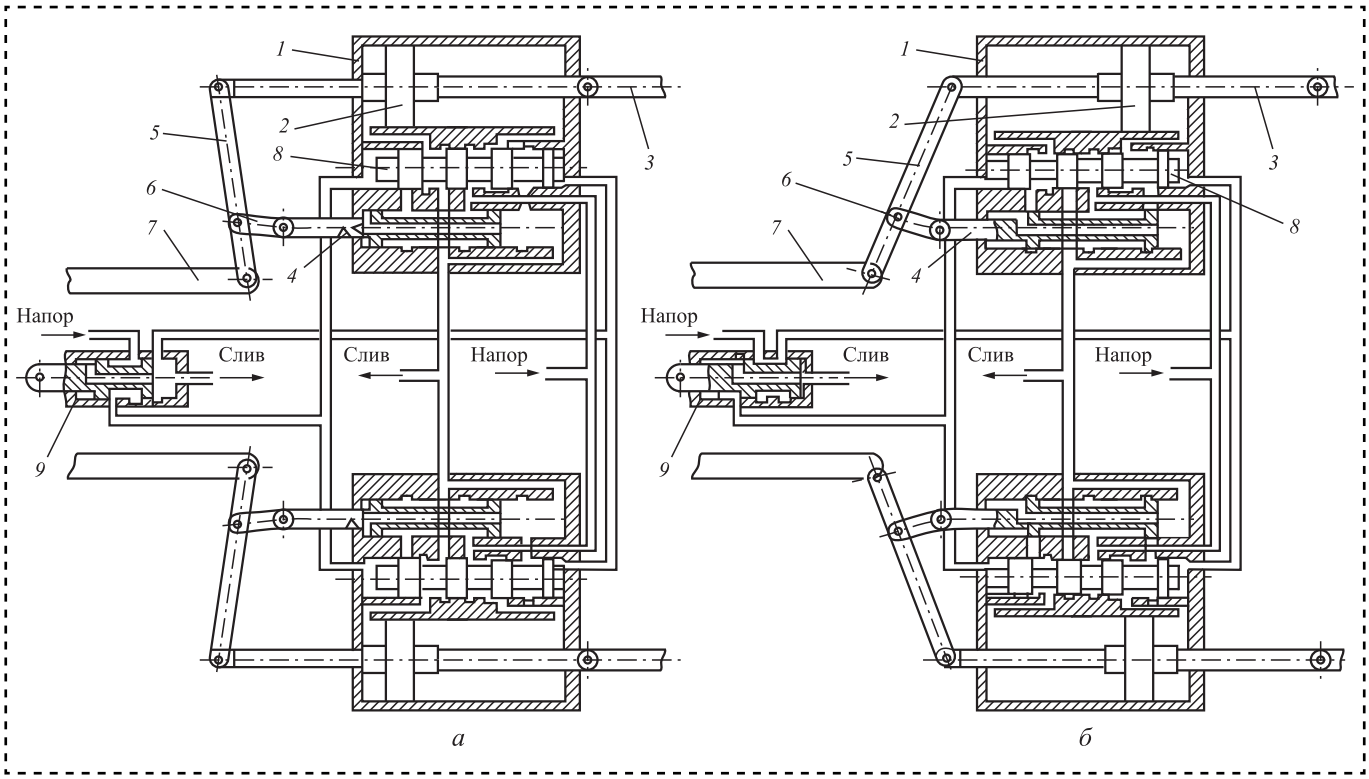

Рис. 4. Привод управления левой и правой заслонками водометных движителей:
а — в положении, соответствующем движению машины на суше; *б* — в положении, соответствующем движению машины на плаву; *1* — корпус гидроусилителя; *2* — поршень; *3* — привод к заслонке; *4* — задающий золотник; *5* — коромысло; *6* — серьга; *7* — элемент привода управления машины на суше; *8* — золотник управления; *9* — двухпозиционный золотниковый распределитель

со сливом, а левую — с напорной магистралью. Поршень *2* под давлением рабочей жидкости будет двигаться вправо и через коромысло *5* и серьгу *6* перемещать задающий золотник *4* до тех пор, пока пояски задающего золотника *4* не перекроют каналы напора и слива. Поршень *2* остановится при этом, а заслонка будет полностью открыта. В этом положении (рис. 4, *б*) при перемещении элемента привода управления поворотом машины *7* вправо будет перемещаться задающий золотник *4*, соединяя правую полость цилиндра с напорной магистралью, а левую — со сливом, вследствие чего поршень *2*, перемещаясь влево через элементы поворота заслонки *3*, закрывает ее, а посредством коромысла *5* и серьги *6* будет перемещать задающий золотник *4* до тех пор, пока пояски его не перекроют каналы напора и слива, и поршень *2* остановится.

Перемещение элементов управления поворотом машины *7* вправо вызовет пропорциональное перемещение поршня *2* элементов поворота заслонки *3*, и соответственно на пропорциональный угол закроется (или откроется при возвращении элементов привода управления поворотом *7* в исходное положение) заслонка. Предложенное устройство является гидроусилителем с жесткой обратной связью по перемещению задающего золотника *4*.

Привод заслонок водометного движителя не требует отдельных рычагов управления заслонками, что упрощает сборку узла, управление машиной, удобно компонуется, имеет меньшую массу по сравнению с существующими конструкциями приводов плавающих машин, имеет гидравлическое сервирование, что снижает силы на органах управления заслонкой водометных движителей, а следовательно, обеспечивает меньшую утомляемость механика-водителя.

Библиографический список

1. **Балдин В.А.** Теория и конструкция танков. М.: Министерство обороны Союза ССР. 1975. 442 с.

2. **Руководство** по материальной части танков ПТ-76 и ПТ-76П. М.: Военное издательство Министерства Обороны СССР, 1967. 375 с.

3. **Боевая** машина пехоты БМП-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ч. 2. М.: Военное издательство, 1988. 352 с.

УДК 621.1

Л.Ю. Руднева, *канд. техн. наук*
(Московский технологический университет)
E-mail: rudnewal@list.ru

Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных агрегатов и приборов, основанное на технологии сборки деталей по принципу равножесткости

Рассмотрен вопрос сборки высокоточных электродвигателей с ресурсом работы более 100 тыс. ч путем создания газовой пленки в газодинамических опорах. В качестве метода достижения точности использован метод групповой взаимозаменяемости по принципу равножесткости.

Consider an assembly of high-precision motors with a service life over 100 thousand hours by creating a gas film in the gas-dynamic supports. As a method of achieving precision used method of group interchangeability on the principle of equal rigidity.

Ключевые слова: сборка, метод групповой взаимозаменяемости, принцип равножесткости.

Keywords: technology, assembly, equal rigidity.

В связи с повышением требований к изделиям ракетно-космической техники (РКТ) — надежности; сокращения времени запуска средств выведения; повышения точности управления, ориентации и стабилизации ракет и космических аппаратов (КА); повышения срока активного существования КА — возникла необходимость в создании технологии и средств технологического оснащения (СТО), обеспечивающих эти требования.

Особое место занимает технология сборки прецизионных агрегатов, формирующая выходные параметры командоаппаратов, электромеханических программных механизмов, приводов раскрытия антенн и солнечных батарей, стабилизированных платформ и др.

К деталям агрегатов, ответственных за управление, ориентацию и стабилизацию космических аппаратов, ракет-носителей и управление исполнительными механизмами изделий РКТ, предъявляют высокие технические требования по точности изготовления и сборки [1].

Также высокие требования предъявляют к производственным помещениям, в которых изготавливают и собирают высокоточные агрегаты. Например, механическую обработку, сборку и контроль параметров газодинамических опор (ГДО) проводят на специальных сейсмически стойких "развязанных" фундаментах.

Для агрегатов с ГДО одно из условий работоспособности — "жесткость" газовой среды (таблица).

Сжимаемость газовой пленки, определяющая "жесткость", описывается уравнением

$$\lambda = \frac{\sigma\mu\omega R^2}{p_a C^2 k_1 k_2}, \qquad (1)$$

где λ — число сжимаемости;

σ — нормальные напряжения, Па;

μ — вязкость смазывающего газа, μ = const;

ω — угловая скорость вращения ротора, $с^{-1}$;

Сжимаемость газовой пленки для основных агрегатов

Радиус опор R, мм	Глубина канавки δ, мм	Число сжимаемости λ
9	0,004	34
8	0,003	29
6	0,003	21

Примечание. Зазор C = 0,002 мм; угловая скорость ω = 30 000 $с^{-1}$; угол наклона канавки к оси опоры β = 60°; p_a = const; μ = const; σ = const.

R — радиус сферической поверхности опоры, мм;

p_a — давление газовой среды, Па;

C — номинальный зазор между опорами и ротором, мм;

k_1, k_2 — критерии геометрических параметров канавки, ограничивающие ее глубину и наклон к оси ГДО.

Из-за проявляющего момента, под действием которого якорь совершает орбитальные движения с частотой, близкой к половине скорости его вращения, расход смазки через зазор приближается к нулю, что в дальнейшем приводит к отказу электродвигателя.

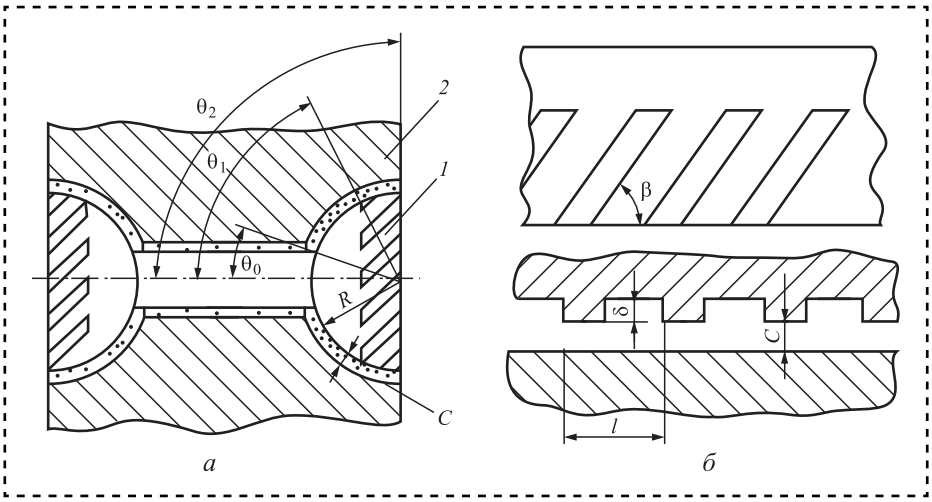

Рис. 1. Механизм образования газовой пленки:
а — газодинамическая опора; *б* — развертка полусферической формы; *1* — опора; *2* — ротор

Взаимосвязь момента трения с параметрами опор и сжимаемостью газовой пленки описывается уравнением:

$$M = 2\pi \int_{\theta_0}^{\theta_1} \left[\frac{1}{\sin\theta} \left(C \frac{\delta p}{\delta \varphi} + \int \frac{\partial q}{\partial \varphi} + \lambda + \sin\theta \right) \right] \sin\theta d\theta, \quad (2)$$

где θ_0, θ_1 — угловой отсчет местоположения границ сферического пояса опор;

q — коэффициент, $q = \left(s - \frac{n^{-2}}{n^{-3}} \right) \sin\varphi \cos\varphi$;

s — ширина секции, мм;

n — разброс значений зазора C по ширине секции, состоящей из впадины и выступа.

Механизм изменения состояния газовой пленки в ГДО при различных режимах работы исследовали в зависимости от состояния газовой пленки в зазоре между опорами и ротором (рис. 1).

В состоянии покоя, когда время работы агрегата $t = 0$, между ротором, находящимся в нижнем положении, и опорами образуется зазор C. При этом момент трения между ротором и опорами максимален.

При включении образуется газовая пленка, ротор "всплывает" и получается зазор, равный 0,001 мм.

При увеличении скорости вращения ротора агрегат выходит на рабочий режим и за счет сжимаемости газовой пленки образуется равномерный зазор между ротором и опорами, который имеет постоянное значение в течение всего времени работы.

Постоянный зазор в ГДО обеспечивается образованием газовой пленки и равножесткостью опор при их сборке (рис. 2). Равножесткость опор

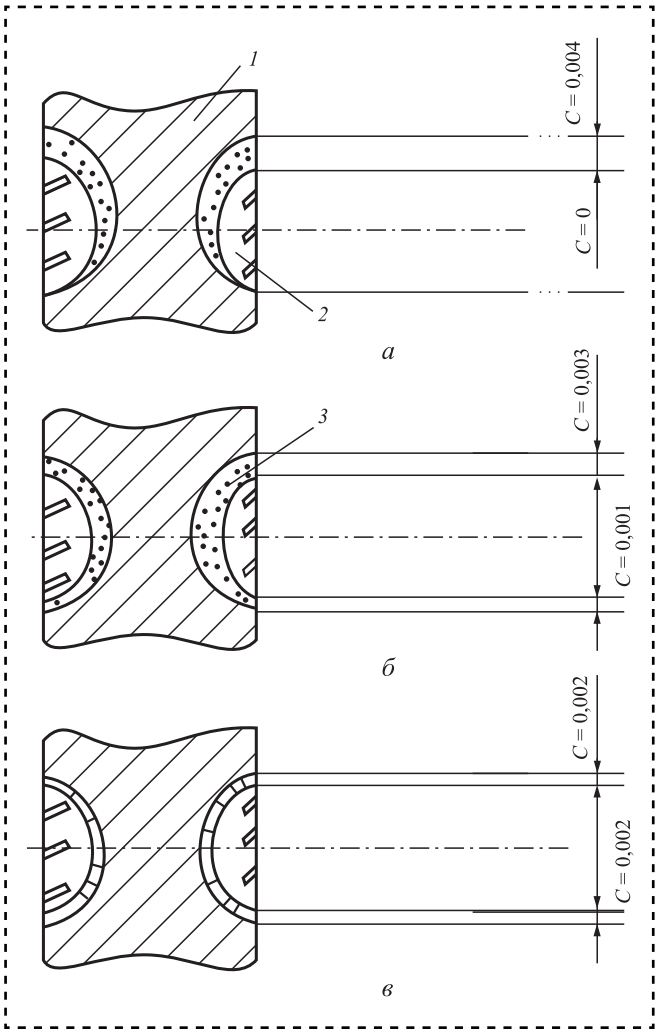

Рис. 2. Механизм изменения зазора в зависимости от состояний газовой пленки в ГДО:
а — состояние покоя ротора; *б* — момент включения прибора; *в* — рабочий режим работы прибора; *1* — ротор; *2* — опора; *3* — газовая пленка; *C* — зазор, мм

и их взаимное расположение значительно снижают возникновение уводящего момента.

Частота резонанса вращения ротора зависит как от массы ротора, так и от сверхмалого зазора в ГДО. Обеспечение сверхмалых зазоров требует стерильности сборки, постоянной температуры и влажности в сборочных помещениях. В соответствии с действующими стандартами сборку агрегатов с ГДО проводят в сборочных помещениях, где размеры взвешенных посторонних частиц не должны превышать 0,8 мкм и не более 35 шт. в 1 л воздуха.

Увеличение жесткости опор и роторов приводит к увеличению срока активного существования и уменьшению по времени при запуске агрегатов с ГДО. Жесткость собираемых деталей определяли опосредованно по глубине канавок опор ГДО.

При увеличении глубины канавок на опорах (на 1 мкм) время активного существования приборов возрастает в 5 раз. Это увеличение характеристик объясняется тем, что в процессе эксплуатации агрегатов с ГДО образуется газовая смазка в зазорах между опорами и чашами роторов.

Разработана концепция технологии сборки деталей ГДО. В отличие от существующих концепций, которые не учитывали жесткость деталей в технологии сборки, она устанавливает взаимосвязь эксплуатационных характеристик агрегатов с технологическими параметрами с помощью критерия жесткости деталей, что позволяет управлять эксплуатационными характеристиками агрегатов (рис. 3).

Определены геометрические (шероховатость и волнистость обрабатываемых поверхностей деталей, их взаимное расположение в собираемых агрегатах) и физические (динамическая и статистическая устойчивость, моменты сопротивления и температура окружающей среды) параметры деталей.

Согласно концепции информация по жесткости деталей поступает вместе с техническими требованиями в коррелятор автоматизированной системы управления эксплуатационными характеристиками. Коррелятор обрабатывает информацию, устанавливает взаимосвязь через интегратор между параметрами жесткости деталей и передает информацию автоматизированному оборудованию для группирования деталей по равножесткости. Тем самым определяется дальнейшая стратегия сборки, направленная на достижение заданных эксплуатационных характеристик [2].

На основании концепции разработана технология сборки опор по равножесткости и проведено исследование влияния жесткости опор на

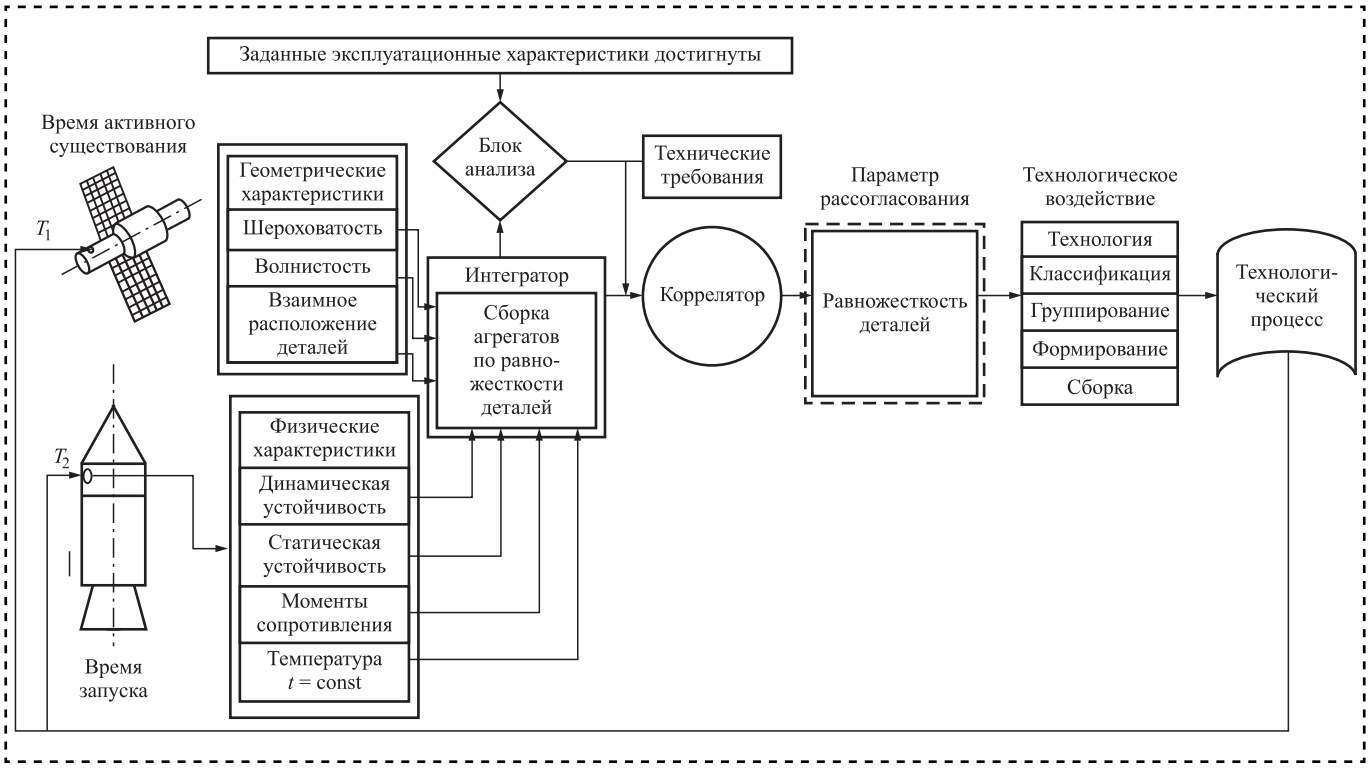

Рис. 3. Схема взаимосвязи эксплуатационных характеристик агрегатов

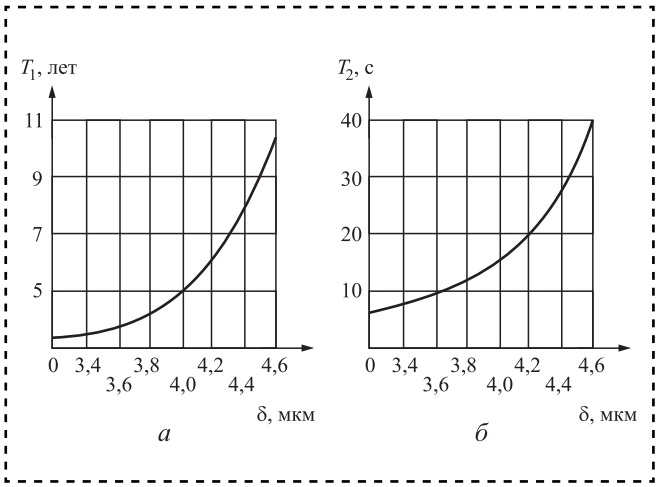

Рис. 4. Взаимосвязь жесткости ГДО с эксплуатационными характеристиками:
а — агрегаты космических аппаратов; *б* — агрегаты носителей; T_1 — время активного существования; δ — глубина канавки ГДО; T_2 — время запуска

эксплуатационные характеристики приборов (рис. 4).

Введение в технологию сборки агрегатов с ГДО контроля геометрических параметров ГДО по глубине канавок на комплектовочные группы и проведение сборки опор по равножесткости исключает динамическую неуравновешенность роторов агрегатов с ГДО и в конечном итоге повышает их эксплуатационные характеристики [3].

Библиографический список

1. **Руднева Л.Ю.** Технология сборки высокоточных электродвигателей с газодинамическими опорами и контактных пластин реле, основанная на принципе равножесткости // Материалы III международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки". М.: МАМИ, 2013. 157 с.

2. **Руднева Л.Ю.** Организация и подготовка производства сборки агрегатов и приборов методом групповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 34—36.

3. **Гродзенский С.Я., Киров А.В.** Особенности формирования качества продукции специального назначения на стадиях жизненного цикла // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 3 (8). 276 с.

Леликов О.П. Подшипники качения: справочник. М.: Инновационное машиностроение", 2017. 667 с.

ISBN 978-5-9908302-9-5

Рассмотрено контактное взаимодействие деталей подшипника. Приведены общие технические требования, технические характеристики подшипников качения, рекомендации по конструированию, монтажу и обслуживанию подшипниковых узлов. Приведены также технические данные новых типов подшипников: класса исполнения Explorer, сенсорных, с керамическими телами качения, с встроенными защитными шайбами или уплотнениями, с электроизолирующими, противоизносными покрытиями.

Приведена номенклатура современных российских и зарубежных подшипников.

Изложена новая методика расчета ресурса подшипников, позволяющая учесть возможную степень загрязнения смазочного материала, качество изготовления и габариты подшипника.

Большое внимание уделено конструкциям уплотнений подшипниковых узлов, схемам установки подшипников и конструктивному оформлению опор на валах и в корпусах.

Представленные материалы сопровождаются многочисленными примерами расчета.

Для инженеров-конструкторов и специалистов всех отраслей промышленности, может быть полезен также слушателям факультета повышения квалификации, студентам вузов.

УДК 621.717

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук,* **Ю.Н. Ануров**
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: Sorokin-mn@mail.ru, ayn2001@mail.ru

Свойства задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка"

Для задачи комплектования показана связь между функциями распределения сопрягаемых параметров и функцией распределения параметров сопряжения. Рассмотрены основные свойства задачи комплектования.

For a matching problem communication between functions of distribution of the interfaced parameters and function of distribution of parameters of interface is shown. The main properties of a matching problem of completing are considered.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, сопрягаемый параметр, параметр сопряжения, свойства задачи комплектования.

Keywords: selective assembly, matching problem, interfaced parameter, parameter of interface, property of a matching problem.

Двухпараметрическая задача комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" в работе [1] является задачей Монжа—Канторовича с индикаторной функцией стоимости. При решении данной задачи методом целенаправленного суммирования обеспечивается максимальная собираемость изделий для требуемого поля допуска параметра сопряжения. В работе [2] двухпараметрическая задача комплектования поставлена как задача определения минимального поля допуска параметра сопряжения при условии полной собираемости изделий. При решении задачи методом полного целенаправленного суммирования определяется минимальное поле допуска параметра сопряжения при условии полной собираемости изделий.

При практической реализации селективной сборки изделий помимо выполнения требования минимального значения поля допуска параметра сопряжения при условии полной собираемости изделий необходимо знать функцию распределения параметра сопряжения для определения вероятности получения бракованных сопряжений.

Дадим постановку расширенной задачи комплектования, когда необходимо обеспечить минимальное значение поля допуска параметра сопряжения при условии полной собираемости изделий и определить функцию распределения параметра сопряжения (рис. 1).

Дано:

случайные величины ξ_i с функцией распределения $f_i(x_i)$, $x_i \in X_i$;

$X = X_1 \times X_2$;

$y = x_1 + x_2$;

$X_y = \{(x_1, x_2): y_1 \leqslant x_1 + x_2 \leqslant y_2\}$, $X_y \in X$,

где x_i — сопрягаемый параметр и его значение, $i = \overline{1, 2}$;

ξ_i — случайная величина, принимающая значения x_i сопрягаемого параметра;

$f_i(x_i)$ — функция распределения случайной величины ξ_i;

X_i — множество значений сопрягаемого параметра x_i, $X_i = [-1, +1]$;

y — параметр сопряжения;

$y = x_1 + x_2$ — уравнение сопряжения;

(x_1, x_2) — совместное значение сопрягаемых параметров x_i;

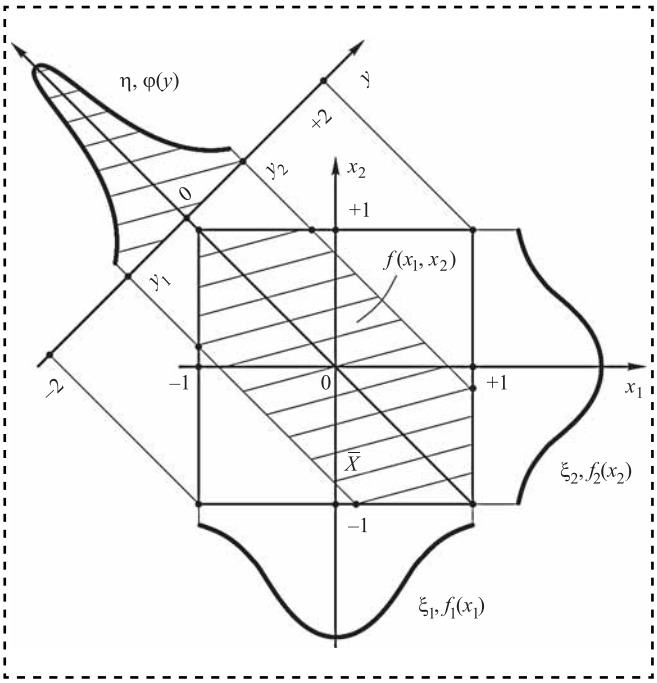

Рис. 1. Графическое представление задачи комплектования

X — множество значений (x_1, x_2) случайной величины $\xi = (\xi_1, \xi_2)$, $X = X_1 \times X_2$;

X_y — множество значений (x_1, x_2), формируемых полем допуска $\delta y = [y_1, y_2]$ параметра сопряжения y;

$\xi = (\xi_1, \xi_2)$ — случайная величина, принимающая значения (x_1, x_2) сопрягаемых параметров x_i;

$f(x_1, x_2)$ — функция распределения случайной величины $\xi = (\xi_1, \xi_2)$;

δy — поле допуска параметра сопряжения, $\delta y = [y_1, y_2]$, где y_1 и y_2 минимальное и максимальное значения y параметра сопряжения.

Определить:

— множество X_y и найти функцию распределения $f(x_i, x_2)$ случайной величины $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ такую, чтобы при выполнении условий

$$\int_{-1}^{+1} f(x_1, x_2)\,dx_1 = f_2(x_2);$$

$$\int_{-1}^{+1} f(x_1, x_2)\,dx_2 = f_1(x_1);$$

$$\iint_{X_y} f(x_1, x_2)\,dx_1 dx_2 = 1,$$

выполнялось требование $\Delta y \to \min$ (допуск параметра сопряжения $\Delta y = y_2 - y_1$);

— отрезок $\delta y = [y_1, y_2]$ и функцию распределения $\varphi(y)$ случайной величины y.

Решение задачи комплектования найдем при ее представлении в дискретном виде. При дискретизации задачи комплектования функции распределения $f_i(x_i)$ сопрягаемых параметров x_i примут значения

$$\bar{x}_{ij_i} = \frac{x_{ij_i-1} + x_{ij_i}}{2},$$

с вероятностью

$$p_{ij_i} = \int_{x_{ij_i-1}}^{x_{ij_i}} f_i(x_i)dx_i,\ j_i = \overline{1, 2n+1},$$

где $2n + 1$ — число селективных интервалов, на которое разбито поле допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i;

j_i — номер точки деления поля допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i на селективные интервалы, когда $j_i = \overline{1, 2n+1}$, или номер селективного интервала сопрягаемого параметра x_i, когда $j_i = \overline{-n, +n}$;

x_{ij_i} — сопрягаемый параметр x_i в точках деления поля допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i на селективные интервалы.

В дальнейшем вместо x_i и y в качестве аргументов для функций распределения сопрягаемых параметров и функции распределения параметра сопряжения будем употреблять индексы j_i и j.

Решение дискретной задачи комплектования состоит из двух этапов (алгоритм диагонального суммирования).

На первом этапе решаем транспортную задачу комплектования методом полного целенаправленного суммирования [3]. В результате получаем совокупность путей комплектования $s(j_1, j_2)$ и собираемость $p(j_1, j_2)$ на этих путях комплектования. При этом обеспечивается полная собираемость, $p = 1$. Определяем поле допуска δj параметра сопряжения y.

На втором этапе получаем значения функции распределения $\varphi(j)$ параметра сопряжения y суммированием собираемости $p(j_1, j_2)$ на путях комплектования $s(j_1, j_2)$, для которых $j = j_1 + j_2$, т.е.

$$\varphi(j) = \sum_{j=j_1+j_2} p(j_1, j_2).$$

Решение задачи комплектования устанавливает связь между функциями распределения $f_i(x_i)$ сопрягаемых параметров x_i и функцией распределения $\varphi(y)$ параметра сопряжения y.

Для определения этой связи выбраны исходные данные:

$$\xi_1 = N\left(0, \sigma_1^2\right),\ 6\sigma_1 = 2,\ \delta x_1 = [-1, +1], \qquad (1)$$

$$\xi_2 = N\left(0, \sigma_2^2\right),\ 6\sigma_2 = 3,\ \delta x_2 = [-1, +1]. \qquad (2)$$

Функции распределения $f_i(x_i)$ сопрягаемых параметров x_i как значения случайных величин ξ_i нормированы на поле допуска δx_i и представлены в виде графиков на рис. 2.

При моделировании задачи комплектования функции распределения $f_i(x_i)$ случайных величин ξ_i и значения δx_i примут дискретные значения — $f_i(j_i)$, $\delta j_i = [-n, +n]$.

Компьютерное моделирование задачи комплектования позволило установить связь между функциями распределения $f_i(x_i)$ сопрягаемых параметров x_i и функцией распределения $\varphi(y)$ параметра сопряжения y и определить свойства задачи комплектования.

Свойство стабильности. Если для функций распределения $f_i(x_i)$ сопрягаемых параметров x_i решить задачу комплектования методом полного целенаправленного суммирования и применить алгоритм диагонального суммирования, то получим функцию распределения $\varphi(y)$, определенную на поле допуска δy, $\delta y = \left[y_1^0, y_2^0\right]$.

Исходные данные для моделирования — $f_i(j_i)$, $n = 8$, $\delta j_i = [-8, +8]$. Результат моделирования значения поля допуска $\delta j = [-2, +2]$ и функции распределения $\varphi(j)$ (рис. 3, кривая *1*):

j	−2	−1	0	+1	+2
$\varphi(j)$	0,084	0,265	0,302	0,265	0,084

Имеет место полная собираемость, $p = 1$.

Свойство смещения. Если поле допуска $\delta x_2 = [-1, +1]$ сопрягаемого параметра x_2 сместить на произвольное число c по оси x_2, $\delta x_2 = [-1 + c, +1 + c]$, и для полученных исходных данных решить задачу комплектования, то функция распределения $\varphi(y)$ останется такой же, как и при определении свойства стабильности. Область определения функции распределения $\varphi(y)$ сместится на c, $\delta y = \left[y_1^0 + c,\ y_2^0 + c\right]$. Полная собираемость сохранится, $p = 1$.

Исходные данные для моделирования задачи комплектования — $f_i(j)$, $n = 8$, $\delta j_1 = [-8, +8]$, $k = 8$, $\delta j_2 = [-8 + k, +8 + k]$, k — целое число. В результате моделирования получим значения функции распределения $\varphi(j)$, которые совпадают со значениями функции распределения $\varphi(j)$ при определении свойства стабильности, и $\delta j = [+6, +10]$ (рис. 4, кривая *1*). Собираемость полная, $p = 1$.

Решение задачи комплектования, определяющей свойство смещения, отличается от решения задачи комплектования, определяющей свойство

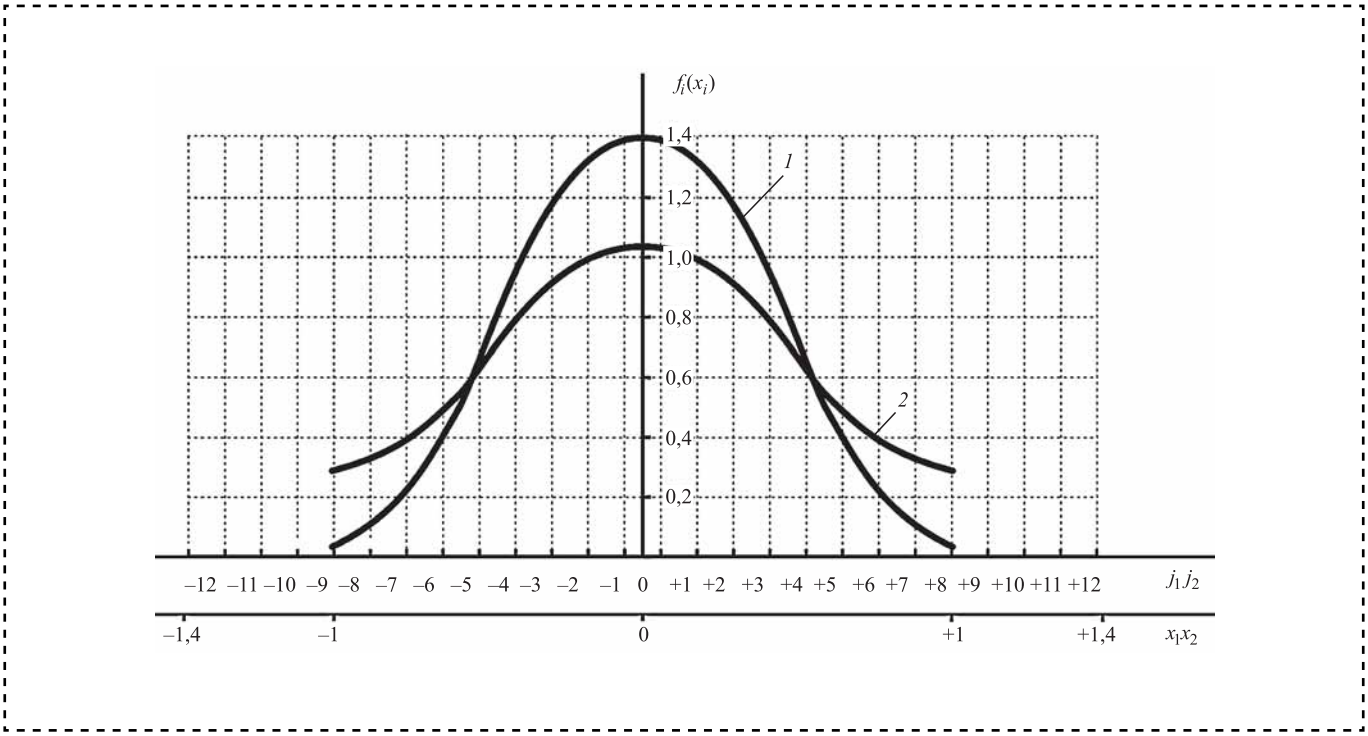

Рис. 2. Графики исходных функций распределения $f_i(x_i)$ при моделировании задачи комплектования:
1 — $6\sigma_1 = 2$; *2* — $6\sigma_2 = 3$

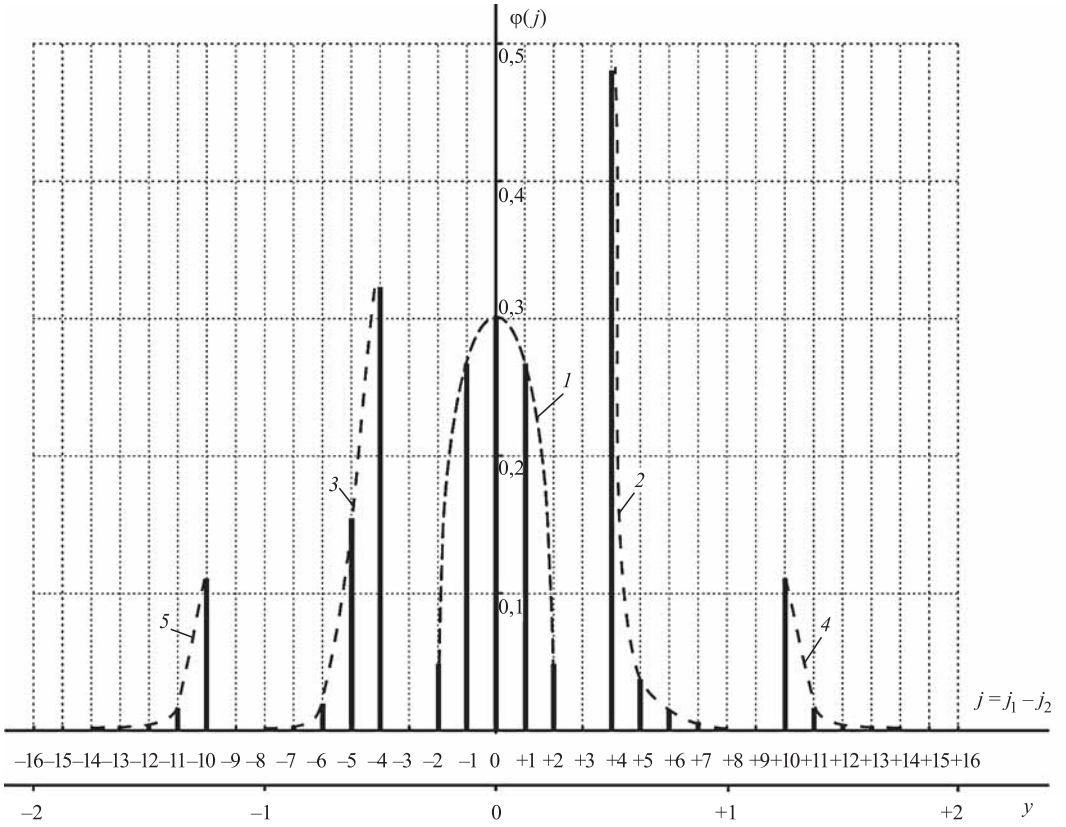

Рис. 3. Графики функций распределения φ(*j*) в случае перемещения поля допуска δ*j* по оси *j*

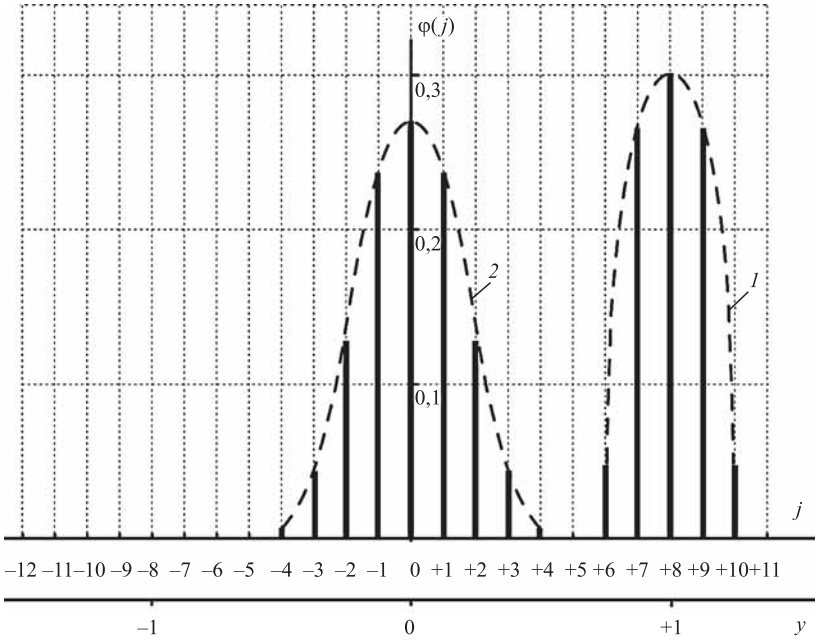

Рис. 4. Графики функций распределения φ(*j*) в случае:
1 — смещения; *2* — расширения поля допуска δ*j* по оси *j*

стабильности тем, что в множестве путей комплектования $s(j_1, j_2)$ и собираемости $p(j_1, j_2)$ для решения, определяющего свойство стабильности, индекс j_2 заменяем на индекс $j_2 + k$.

Свойство расширения поля допуска. Если поле допуска δx_2 сопрягаемого параметра x_2 увеличить на $2h$ (h — произвольное число), т.е. $\delta x_2 = [-1 - h, +1 + h]$, поле допуска δx_1 оставить без изменения, то при решении задачи комплектования поле допуска δy увеличится на $2h$, т.е. $\delta y = \left[y_1^0 - h/2,\ y_2^0 + h/2\right]$. Полная собираемость сохраняется, $p = 1$.

Исходные данные для моделирования задачи комплектования — $f_i(j)$, $n = 8$, $\delta j_1 = [-8, +8]$, $k = 8$, $\delta j_2 = [-8 - k, +8 + k]$ (k — целое число). В результате моделирования получим значения и поля допуска $\delta j = [-4, +4]$ и функции распределения $\varphi(j)$ (рис. 4, кривая *2*):

j	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4
$\varphi(j)$	0,006	0,034	0,108	0,216	0,272	0,216	0,108	0,034	0,006

Свойство уменьшения собираемости. Согласно свойству стабильности для функций распределения $f_i(x_i)$ решение задачи комплектования однозначно, единственным образом определяет функцию распределения $\varphi(y)$ на поле допуска $\delta y = \left[y_1^0, y_2^0\right]$ при выполнении условия полной собираемости, т.е. при $p = 1$.

Свойство уменьшения собираемости заключается в следующем. Если полученный отрезок $\delta y = \left[y_1^0, y_2^0\right]$ перемещать вдоль оси y и для каждого перемещенного значения δy получать решение задачи комплектования в виде функции распределения $\varphi(y)$ и собираемости p, то вид функции распределения $\varphi(y)$ существенно изменится и собираемость p будет уменьшаться.

Исходные данные для моделирования задачи комплектования — $f_i(j_i)$, $n = 8$, $\delta j_i = [-8, +8]$, $\delta j = [-2, +2]$. В результате моделирования получим значения функции распределения $\varphi(j)$ и собираемости p (таблица).

На рис. 3 графики *1—5* показывают, что с перемещением поля допуска $\delta j = [-2, +2]$ от своего центрального положения по оси j собираемость p падает, вид графиков функции распределения $\varphi(j)$ существенно меняется.

Свойство симметрии. Если исходные данные при моделировании расширенной задачи комплектования являются симметричными функциями, то и функция распределения $\varphi(j)$ параметра сопряжения y является симметричной. Это подтверждается свойствами стабильности, смещения и расширения поля допуска.

Знание свойств задачи комплектования позволяет понять физическую природу задачи Монжа—Канторовича, что дает возможность определять поля допусков сопрягаемых параметров, если известно требуемое поле допуска параметра сопряжения [4].

При разработке технологического процесса селективной сборки изделий типа "вал—втулка" исходят из требуемого поля допуска параметра сопряжения, его величины и расположения на размерной оси. Зная требуемое поле допуска

Функция распределения $\varphi(j)$ и собираемости p при перемещении поля допуска δj по оси j

δj	$\varphi(j)$, j						p
[−14, −10]	j	−14	−13	−12	−11	−10	0,141
	$\varphi(j)$	0	0	0	0,034	0,107	
[−8, −4]	j	−8	−7	−6	−5	−4	0,546
	$\varphi(j)$	0,019	0,020	0,054	0,123	0,330	
[−2, +2]	j	−2	−1	0	+1	+2	1,000
	$\varphi(j)$	0,084	0,265	0,302	0,265	0,084	
[+4, +8]	j	+4	+5	+6	+7	+8	0,546
	$\varphi(j)$	0,477	0,042	0,016	0,009	0,002	
[+10, +14]	j	+10	+11	+12	+13	+14	0,141
	$\varphi(j)$	0,115	0,020	0,006	0	0	

параметра сопряжения, необходимо разработать такой технологический процесс получения полей допусков сопрягаемых параметров и их расположения на размерной оси, чтобы требование к полю допуска параметра сопряжения выполнялось.

Все рассуждения проведены при условии, что сопрягаемые параметры и параметр сопряжения не имели погрешностей измерения.

Выводы

1. Представлена математическая модель двухпараметрической задачи комплектования, которая устанавливает связь между исходными функциями распределения сопрягаемых параметров и функцией распределения параметра сопряжения при условии полной собираемости и минимального значения поля допуска параметра сопряжения.

2. Представлены основные свойства двухпараметрической задачи комплектования, полученные при решении дискретной расширенной задачи комплектования методом полного целенаправленного суммирования с использованием алгоритма диагонального суммирования для получения дискретной функции распределения параметра сопряжения.

3. Знание свойств двухпараметрической задачи комплектования позволяет определять поля допусков сопрягаемых параметров, если известно требуемое поле допуска параметра сопряжения.

Библиографический список

1. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 8. 2011. С. 74—82.

2. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Урманова Д.И.** Определение минимального допуска на параметр сопряжения при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" при условии полной собираемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 10. 2014. С. 25—28.

3. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 9. 2012. С. 15—18.

4. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Выбор полей допусков сопрягаемых параметров при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 3. 2013. С. 28—34.

Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Бабаев А.С. Инструментальное обеспечение сверления глубоких и точных отверстий малых диаметров / под общ. ред. С.В. Кирсанова. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 188 с.: ил.

ISBN 978-5-9907638-1-4

Рассмотрены современные конструкции ружейных сверл с твердосплавными стеблями, применяемые для сверления глубоких и точных отверстий малых диаметров. Даны рекомендации по их проектированию, изготовлению и эксплуатации. Приведены сведения о технологических возможностях этих инструментов.

Для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий, может быть полезна студентам втузов.

УДК 681.2:658.5

Р.М. Гоцеридзе, *канд. техн. наук,* **З.Ф. Уразаев**
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
E-mail: mayex@yandex.ru

Технологический микроклимат сборочных цехов

Рассмотрены основные вопросы технологической гигиены выпуска высокоточных современных приборов. Описаны параметры технологического микроклимата, степень чистоты воздуха, источники пыли и т.д., а также способы и средства создания технологического микроклимата.

Describes main issues concerning process hygiene of manufacture of modem high accuracy instruments. Includes description of designs of instruments and devices, maintenance of required parameters of the process microclimate, degree of air purity, dust sources, etc., as well as the methods and means of creation of the process microclimate.

Ключевые слова: технологический микроклимат, температура воздуха, влажность, отопление, вентиляция, степень чистоты воздуха, технологическая гигиена.

Keywords: process microclimate, temperature, humidity, heat, ventilation, degree of air purity, process hygiene.

Микроклимат — это совокупность физических параметров воздушной среды — температуры, относительной влажности, скорости ветра (сквозняк) и т.д. на небольших пространствах. Особую значимость имеет технологический микроклимат, являющийся частью системы мероприятий, которые обеспечивают выпуск надежных изделий высокой точности.

Для выпуска стабильных по выходным характеристикам высокоточных современных приборов существенное значение имеет технологическая гигиена, предусматривающая:

— разработку технологических процессов из таких операций и приемов работы, которые исключают или уменьшают возможность загрязнения изделий и их элементов;

— применение чистых и сверхчистых жидкостей и газов, используемых как для выполнения отдельных технологических операций (промывка, продувка и т.д.), так и для заполнения полостей приборов;

— создание технологического микроклимата в производственных цехах или на отдельных рабочих местах — боксах.

Технологический микроклимат характеризуется степенью очистки воздушной среды от механически "взвешенных" частиц или пылинок, точностью поддержания требуемой температуры, влажности и давления воздуха, а также видом и степенью его подвижности. Поддержание требуемых параметров технологического микроклимата или соблюдение правил технологической гигиены необходимо как при производстве высокоточных электромеханических приборов (электрические двигатели малой мощности различного назначения, гироскопические приборы, датчики линейных ускорений и т.д.), так и при производстве целого ряда радиоэлектронных устройств, построенных на основе микросхемотехники и интегральной электроники. Конструкция таких приборов и устройств должна удовлетворять определенным требованиям технологичности, стерильности, без соблюдения которых окажется малоэффективным соблюдение правил технологической гигиены. Например, регулировочные прокладки — шайбы, обычно изготавливаемые штамповкой из листового материала, в "стерильных" конструкциях заменяют на прокладки со шлифованными торцами, так как гарантировать полное отсутствие или удаление заусенцев у штампованных прокладок трудно. Заусенцы могут оторваться от прокладки, попасть в опоры подвижных элементов или другие микрозазоры и нарушить работу прибора.

Для получения конструктивной стерильности учитывают целый ряд требований. Подбор материалов и назначение форм отдельных элементов деталей или самих деталей в целом, а также компоновки той или иной сборочной единицы проводят с учетом исключения (уменьшения) возможности накопления загрязняющих частиц на элементах прибора как в процессе его производства, так и в процессе эксплуатации.

При создании технологического микроклимата легко решают вопросы поддержания требуемой температуры и давления воздуха, параметров организованного его движения — направления и скорости воздушного потока, системы регулирования разной степени сложности (датчики температуры или давления и исполнительные механизмы).

Более сложную техническую проблему представляет обеспечение определенной чистоты воздуха в производственных помещениях.

Степень чистоты воздуха определяют допустимым количеством и наибольшими размерами частиц пыли в единице объема. В зависимости от вида и точности собираемых приборов требования к производственным помещениям могут изменяться. Помещения по параметрам технологического микроклимата можно разделить на несколько классов чистоты, отличающихся также точностью поддержания температуры, давления и влажности по ГОСТ Р ИСО 14644-1—2002 (табл. 1).

Производство отдельных видов приборов или выполнение определенных сборочных операций предъявляет к производственным помещениям различные требования по чистоте:

- Класс 1 (ISO3)

Производство интегральных микросхем.

- Класс 10 (ISO4)

Производство интегральных микросхем с расстоянием между проводниками менее 2 мкм.

- Класс 1000 (ISO6)

Производство оптических элементов высокого класса. Сборка и испытания прецизионных гироскопов. Сборка миниатюрных подшипников.

- Класс 10 000 (ISO7)

Точное машиностроение, гидравлика и пневматика, сборка прецизионного гидравлического и пневматического оборудования, клапанов с сервоприводами, высокоточных часовых механизмов, трансмиссий высокого качества.

- Класс 100 000 (ISO8)

Пластиковое производство, автомобильная промышленность, сборка электронных компонентов, сборка гидравлических и пневматических устройств.

В производственных помещениях температура воздуха не должна выходить за пределы 20...25 °С и поддерживается с точностью от ±0,1 до ±5 %. Скорость изменения температуры — не более 2 °С/ч.

Влажность воздуха более 50 % способствует коррозии металлов, что сопровождается образованием пыли. Поэтому для поддержания технологического микроклимата влажность воздуха должна быть 45 ± 10 %.

Таблица 1

Требования к чистоте воздуха

U.S. federal standart 209E (9/1992) Eng	Класс чистоты по ГОСТ Р ИСО 14644-1—2002	Концентрация, частиц/м^3, пыли в воздухе размером, мкм					
		⩾0,1	⩾ 0,2	⩾ 0,3	⩾ 0,5	⩾ 1	⩾ 5
—	ИСО 1	10	2	—	—	—	—
	ИСО 2	100	24	10	4	—	—
1	ИСО 3	1000	237	102	35	8	—
10	ИСО 4	10 000	2370	1020	352	83	—
100	ИСО 5	100 000	23 700	10 200	3520	832	29
1000	ИСО 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8320	293
10 000	ИСО 7	—	—	—	352 000	83 200	2 930
100 000	ИСО 8	—	—	—	3 520 000	832 000	29 300
1 000 000	ИСО 9	—	—	—	35 200 000	8 320 000	293 000

При сборке многих приборов некоторые операции выполняют в более "чистых" условиях, чем все остальные, по которым определяют требования к параметрам микроклимата производственного помещения цеха. В таких случаях рабочие места, за которыми закреплены эти операции, оборудуют в виде индивидуальных боксов. В эти боксы подают более тщательно отфильтрованный воздух под давлением, несколько превышающим давление воздуха в основном помещении цеха.

Источники, образующие пыль относительно помещения с микроклиматом, можно подразделить на *наружные* и *внутренние*. Наружные источники могут быть естественные или непроизводственные, не связанные с деятельностью человека (пыль из-за эрозии почвы, продукты жизнедеятельности растений, насекомых, животных и т.д.), и производственные, создающие пыль в процессе деятельности человека (все виды транспорта, металлургические, цементные, химические предприятия, система отопления, земледелия и т.д.). Концентрация пыли в воздухе, мг/м^3, зависит от места, где берется проба:

Сельская местность (пригород)	0,05...0,50
Городские районы	0,1...1,0
Промышленные центры	0,2...5,0
Производственные помещения	5,0...10,0

Независимо от наружных источников пыли имеются технические средства обеспечения чистоты воздуха в механообрабатывающих или сборочных цехах не только в соответствии с требованиями табл. 1, но и при увеличении этих требований на один или даже два порядка.

Внутренние источники загрязняющих частиц в помещении — это деятельность работающего в нем персонала. В зависимости от характера и интенсивности действий один человек генерирует за 1 мин от $1 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^7$ частиц диаметром от 0,3 мкм и более (рис. 1).

Загрязнителями воздуха внутри помещения могут быть:

— пыль, вносимая работающими снаружи на одежде и обуви, на деталях, материалах и инструментах;

— пыль и ворс технологической одежды;

— частицы, образующиеся в результате разрушения или изнашивания конструкций зданий или оборудования под влиянием изменения температуры и влажности, вибраций и т. п.;

— частицы, выделяемые при выполнении операций технологических процессов;

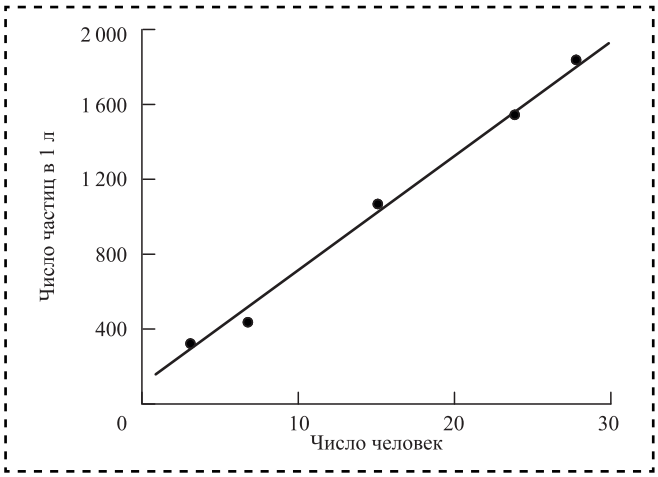

Рис. 1. Зависимость запыленности воздуха в помещении от числа персонала

— загрязнения от технологических газов, жидкостей и смазок;

— потовые выделения с рук человека в виде жировых и солевых частиц, а также частиц волоса или шелушения кожи и т.д.

Распределение частиц пыли в воздухе учитывают при создании чистых помещений, особенно тех частиц, которые могут нанести вред изделию. Распределение числа частиц по диаметрам обуславливается многими факторами — удельным весом, формой и объемом частиц, броуновским движением, временем года, дня или рабочей смены, вязкостью воздуха (табл. 2).

По массе частицы диаметром менее 5 мкм составляют только 1 % от всей находящейся в воздухе пыли. Но для производства многих изделий высокой точности опасен именно этот 1 % пыли, так как число этих частиц составляет 95 % от всех находящихся в воздухе частиц и эти частицы труднее "задержать" сложной системой фильтров.

Способы и средства создания технологического микроклимата охватывают целый ряд

Таблица 2

Примерное распределение пыли по средним диаметрам в воздухе городов

Средний диаметр частиц, мкм	Доля частиц пыли, %	Число частиц пыли в 1 л
0,25 (0...0,5)	1	1 300 000
0,75 (0,5...1,0)	2	100 000
2,0 (1,0...3,0)	6	15 000
4,0 (3,0...5,0)	11	3000
7,5 (5,0...10,0)	52	2400
20,0 (10,0...30,0)	28	70

взаимно связанных организационно-технических мероприятий.

Так как более 80 % загрязняющих частиц в производственных помещениях генерируется деятельностью работающих там людей, необходимо изолировать операции технологического процесса от людей, т.е. максимально автоматизировать производственный процесс. Это положение остается справедливым и для случая выпуска небольшой партии высокоточных приборов.

Многообразные организационно-технические мероприятия, способы и средства создания микроклимата группируют по основным направлениям:

1. Изоляция помещений от частиц пыли наружного воздуха. Производственные здания строят "глухими", без окон, с искусственным освещением; места для строительства зданий выбирают вблизи естественных водоемов или окружают искусственными водонаполненными каналами; вход работников в производственные помещения выполняют в виде шлюзов с обдувочно-вытяжной вентиляцией. Здания оборудуют кондиционерами, обеспечивающими смену воздуха в производственных помещениях от 60 до 120 раз в 1 ч. В "чистых" помещениях имеется небольшое избыточное давление, что также предохраняет эти помещения от проникновения частиц пыли из окружающей внешней среды.

2. Уменьшение пылеобразования в помещениях. Техническую документацию оформляют на неворсистом специально обработанном материале, рабочие имеют спецодежду из таких "непылящих" материалов, как нейлон или лавсан (степень запыленности воздуха от лавсановых халатов в 10 раз меньше, чем от хлопчатобумажных). Большое внимание уделяют личной гигиене работников: в "чистые" помещения не допускают работников с потливостью рук больше нормы; мужчинам не разрешается носить бороду и усы, а женщинам пользоваться осыпающимися косметическими средствами.

Для предохранения от соприкосновения рук работников с чувствительными к загрязнению деталями используют перчатки и напальчники из специально обработанной резины, ими нельзя прикасаться к лицу, волосам, одежде (за смену напальчники меняют 4—8 раз, а перчатки — 1—2 раза).

3. Удаление частиц пыли из чистых помещений проводят регулярно 2—3 раза в течение рабочей смены: пылесосами, протиркой полов, стен помещения или верстаков влажными материалами и т.д. Предъявляют определенные требования к внутренней отделке производственных помещений — сопряжение стенок с полом и между собой должно проходить не под острым углом, а под определенным допустимым наименьшим радиусом, окраска стен и полов специальными красками или "монолитными" лаками, не имеющими поверхностных пор, или покрытие стен, полов и верстаков — рабочих мест специальными пленками; рабочие места — верстаки, шкафы для хранения инструмента и задела деталей и первичных сборочных единиц изготавливают из металла и стекла такой формы, которая предотвращает накопления пыли [2].

4. Предохранение деталей и сборочных единиц от частиц пыли при их транспортировке входит в общую систему мероприятий по обеспечению технологического микроклимата. Учитывают и транспортировку деталей от одной операции к другой или с участка на участок и хранение на складах, включая межоперационные склады.

Для этого применяют герметичные стеклянные банки с притертыми пробками, металлические и пластмассовые коробки, покрытые стеклоэмалью. Такая герметичная тара предохраняет детали и от загрязнения, и от механических повреждений. Детали хранят на складах в шкафах с чистым сухим воздухом либо инертным газом, а также в вакуумных камерах.

5. Контроль параметров воздушной среды производственного помещения имеет важное значение для поддержания в них технологического микроклимата. Запыленность воздуха проверяют методом осаждения: в различных участках помещения располагают чисто промытые и высушенные стеклянные пластинки. После выдерживания в течение некоторого времени (0,5...1,0 ч) на уровне рабочего стола пластину накрывают другой стеклянной чистой пластиной и с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1 подсчитывают число частиц (пылинок) и измеряют их размеры на 1 см^2 площади контрольной стеклянной пластинки и сравнивают с экспериментально установленными нормами. Более совершенными являются фотоэлектрические счетчики, определяющие число пылинок разных размеров, в зависимости от интенсивности рассеивания света. К таким приборам относят фотоэлектрические анализаторы АЗ-2М, АЗ-5, АЗ-4, предназначенные для измерения

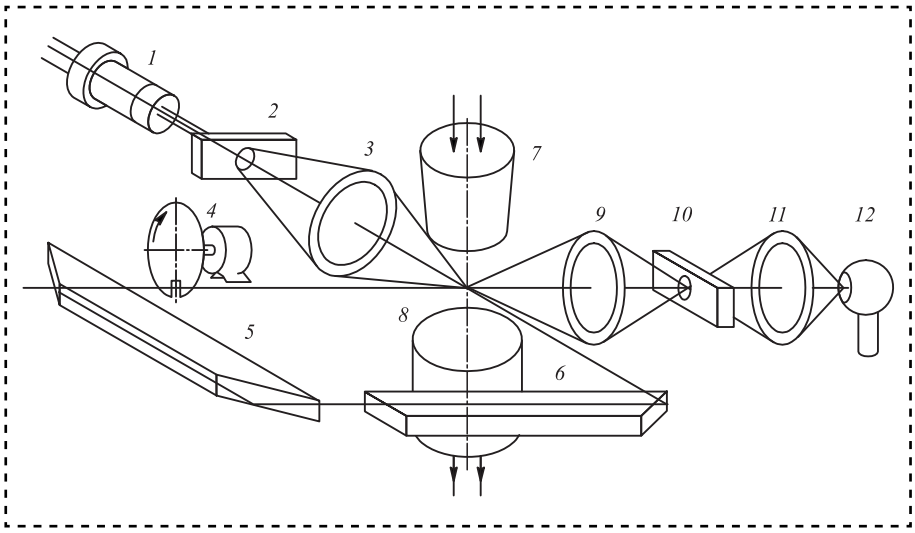

Рис. 2. Схема фотоэлектрического анализатора для измерения запыленности воздуха:
1 — фотоумножитель; *2* — диафрагма; *3* — объектив; *4* — калибратор; *5*, *6* — световоды; *7* — сопло; *8* — корпус прибора; *9—11* — объектив; *12* — лампа

запыленности воздуха или неагрессивных технологических газов в помещениях или газовых коммуникациях, камерах, боксах при атмосферных или небольших избыточных давлениях. Эти приборы позволяют определить число частиц размером от 0,23 до 10 мкм, причем можно определить и распределение числа частиц на разных интервалах изменения их размеров в этом диапазоне.

Прибор используют также для оценки качества работы фильтрующих устройств или отыскания интенсивных "генераторов" пыли — разгерметизации окон или недостатков технологического оборудования, особенно вновь установленного и еще не исследованного (рис. 2). Осветитель, состоящий из источника света *12*, объектива *11*, *10* и *9*, создает световой луч, перпендикулярный к лучу зрения фотоумножителя *1*, образованному диафрагмой *2* и объективом *3*. Оба луча в месте их перекрещивания имеют примерно одинаковые размеры поперечного сечения и образуют чувствительный или измерительный объем прибора. Исследуемый объем пробы воздуха из сопла *7* продувается через измерительный объем прибора перпендикулярно к плоскости двух лучей и выходит через корпус *8* прибора. При попадании в измерительный объем прибора частички пыли количество рассеянного света, попадающего от осветителя *12* на фотоумножитель *1*, увеличивается. На выходе фотоумножителя возникает электрический импульс, длительность которого пропорциональна времени пролета частицей измерительного объема, а величина — размерам частиц.

Для контроля и регулирования чувствительности прибора он снабжен внутренним оптико-механическим калибратором, который посредством световодов *5* и *6* направляет дозированный световой поток от осветителя в фотоумножитель. Этот дозированный светопоток модулируется калибратором *4*, состоящим из электродвигателя и диска со щелью. Калибратор позволяет скорректировать изменение чувствительности прибора из-за уменьшения со временем светоотдачи лампы *12*, прозрачности объективов, изменения параметров фотоумножителя и усилителя.

Кроме средств контроля параметров технологического микроклимата в производственных помещениях необходимо соблюдение определенных организационных форм выполнения этого контроля (один, два или три раза в смену, на одном, двух или более участках помещения и т.д.).

Библиографический список

1. **Асс Б.А., Уразаев З.Ф., Мясников Б.Я.** Сборка, регулировка и испытание авиационных приборов. М.: Машиностроение, 1969. 314 с.

2. **Куприянов И.П.** Технологический микроклимат. М.: Советское радио, 1976. 176 с.

3. **Медведев А.М.** Сборка и монтаж электрических устройств. М.: РИЦ "Техносфера", 2007. 255 с.

4. **Осетров И.А., Сланцев Е.С.** Сборка в машиностроении, приборостроении, теория, технология и организация. Ижевск: ИжГТУ, 2015. 328 с.

5. **Схиртладзе А.Г., Осетров В.Г., Иванова Т.Н., Главатских Г.Н.** Основы механосборочного производства. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 292 с.

УДК 629.463

Т.В. Иванова, *канд. техн. наук*
(Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ) г. Чита),
В.А. Петровых
(Забайкальская дирекция инфраструктуры, г. Чита),
Д.Г. Налабордин
(Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ) г. Чита)
E-mail: denis_gn@mail.ru

Определение износа гребня колеса грузового вагона

Рассмотрены результаты дорожного эксперимента по определению износа гребня колеса платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров на полигоне Транссибирской магистрали в направлении Владивосток — Силикатная. Получена функциональная зависимость износа гребня от пробега вагона.

In article results of road experiment on determination of wear of a wheel flange of a platform for transportation of large-capacity containers on a polygon of the Trans-Siberian master in the direction Vladivostok — Silicate are considered. Functional dependence of size of wear of a crest on run of the car is received.

Ключевые слова: износ гребня, платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров, наработка до предельного износа гребня.

Keywords: wear of a crest, a platform for transportation of large-capacity containers, an operating time to limiting wear of a crest.

Техническое состояние поверхности катания и гребня колеса оказывает огромное влияние на плавность хода вагона и взаимодействие с путями, особенно при прохождении стрелочных переводов.

Износы гребня цельнокатаного колеса образуются вследствие взаимодействия гребня колеса с головкой рельса. Этот процесс интенсифицируется при ненормируемой работе колесной пары, вызываемой ее неправильной установкой в тележке, значительной разницей диаметров кругов катания колес одной колесной пары, несимметричной посадкой колес на ось, а также из-за сужения рельсовой колеи. Во всех случаях колесная пара перекашивается в рельсовой колее и увеличивается частота набегания гребня на боковую грань головки рельса.

В настоящее время основное число поступлений вагонов во внеплановый текущий ремонт происходит из-за сверхнормативного износа гребня колеса. В 2015 г. на полигоне Забайкальской железной дороги отцеплено 3888 вагонов по предельному износу гребня колеса (рис. 1 на стр. 2 обложки).

В рамках детального изучения проблемы интенсивности износа гребней грузовых вагонов проведен эксперимент на полигоне Транссибирской магистрали. Эксперимент был инициирован Забайкальским институтом железнодорожного транспорта при непосредственной поддержке и содействии службы вагонного хозяйства Забайкальской дирекции инфраструктуры.

Цель исследования — определение удельного износа гребней колес, эксплуатируемых на платформах для перевозки крупнотоннажных контейнеров в условиях полигона Транссибирской магистрали.

Задачи, решаемые в ходе исследования:

— экспериментальная поездка в составе грузового поезда по Транссибирской магистрали от станции Владивосток до станции Силикатная;

— получение массива экспериментальных данных по замерам толщин гребней подконтрольной группы вагонов на конечных и промежуточных станциях полигона испытаний;

— разработка методики обработки экспериментальных данных для получения усредненного износа гребня колеса;

— расчет удельного износа гребня в условиях эксплуатации грузового вагона на полигоне Транссибирской магистрали.

Научная новизна исследования:

— уникальность проведения эксперимента, полигон которого охватил весь участок Транссибирской магистрали;

— получение точных экспериментальных оценок износа гребней платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров на полигоне испытания;

— определение функциональной зависимости износа гребня от наработки для конкретного типа грузового вагона.

Порядок проведения эксперимента:

— в хвост грузового поезда № 1297 прицепляли тормозоиспытательный вагон службы вагонного хозяйства Забайкальской дирекции инфраструктуры (рис. 2 на стр. 2 обложки);

— полигон — участок Транссибирской магистрали от станции Владивосток Дальневосточной железной дороги до станции Силикатная Московской железной дороги. Расстояние составило 8771 км;

— толщины гребней грузовых вагонов измеряли у подконтрольной группы с порядковыми номерами в составе поезда — 1, 4, 10, 16, 21, 27, 33, 39 и на станциях, где было предусмотрено техническое обслуживание грузового поезда (таблица);

— в качестве средства измерения использовали электронный прибор "МАИК" (рис. 3 на стр. 2 обложки).

Техническая характеристика прибора для измерения диаметра и толщин гребней колес «МАИК»

Измеряемые диаметры колес, мм	844...964
Точность измерения диаметра, мм	0,5
Измеряемая толщина гребня, мм	24...34
Точность измерения толщины гребня, мм	0,5
Объем хранимой информации, не менее измерений	44 000
Рабочий диапазон температур, °С	−30...+50
Масса, кг	2,8

Характеристика поезда:

— в составе поезда № 1297 40 платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров, масса поезда 3075 т, условная длина — 73 вагона.

— в подконтрольную группу вагонов входили платформы моделей 23-469-07 и 13-1281 с длиной по осям сцепления более 25 м.

Получены массивы данных по замерам толщин гребней подконтрольной группы вагонов по каждой станции, где проводилось их техническое обслуживание. Объем выборочной совокупности значений толщин гребней по каждой станции составил 64 значения.

Перечень станций

Станция	Железная дорога	Расстояние, км
Владивосток	Дальневосточная	0
Хабаровск		755
Белогорск	Забайкальская	1416
Карымская		2996
Нижнеудинск	Восточно-Сибирская	4205
Инская	Западно-Сибирская	5552
Войновка	Свердловская	6740
Юдино	Горьковская	7952
Силикатная	Московская	8771

Методика обработки экспериментальных данных основывалась на гипотезе, что выборка (толщины гребней, измеренные у подконтрольной группы вагонов) распределена по нормальному закону. По мере наработки поезда (прохождения заданных участков) изменялись только параметры распределения. Разность параметров выборочного среднего на конечных станциях полигона — средняя величина износа гребня колеса грузового вагона на участке обращения:

$$\bar{X}_{\text{нечетный}} = \bar{X}_{\text{Владивосток}} - \bar{X}_{\text{Силикатная}}, \qquad (1)$$

где $\bar{X}_i$ — выборочное среднее по толщинам гребней подконтрольной группы вагонов на i-й станции, мм.

Порядок обработки экспериментальных данных [1]:

1) по массивам экспериментальных данных строили: вариационный ряд, статистическое распределение и гистограммы частот;

2) проводили статистические расчеты по выравниванию экспериментальных данных теоретическому закону распределения, определяли числовые характеристики распределения (математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратичное отклонение);

3) определяли средний износ гребня колеса при прохождении поездом участка Транссибирской магистрали.

График изменения выборочного среднего и сравнение распределений толщин гребней грузовых вагонов в поезде № 1297 на конечных станциях эксперимента представлены на рис. 4 и 5.

Средний износ гребня колеса платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров при следовании в составе поезда между конечными станциями составил 1,05 мм [2].

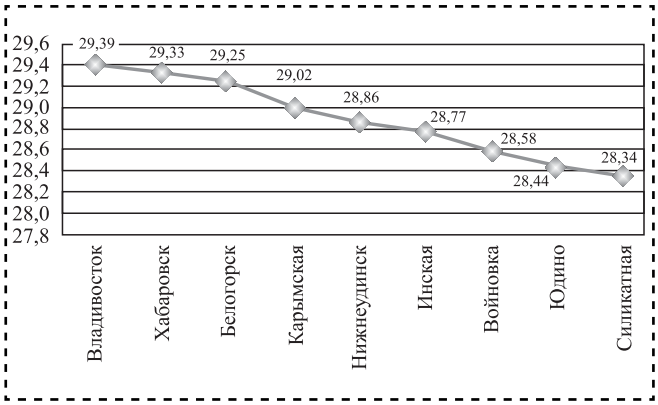

Рис. 4. Изменение выборочного среднего толщин гребней подконтрольной группы вагонов в поезде № 1297

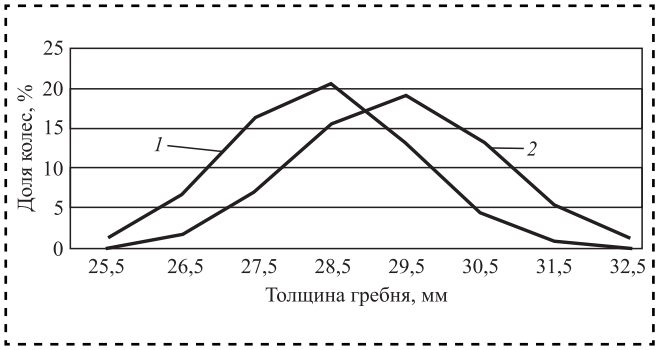

Рис. 5. Распределение толщин гребней подконтрольной группы вагонов на станциях:
1 — Владивосток; *2* — Силикатная

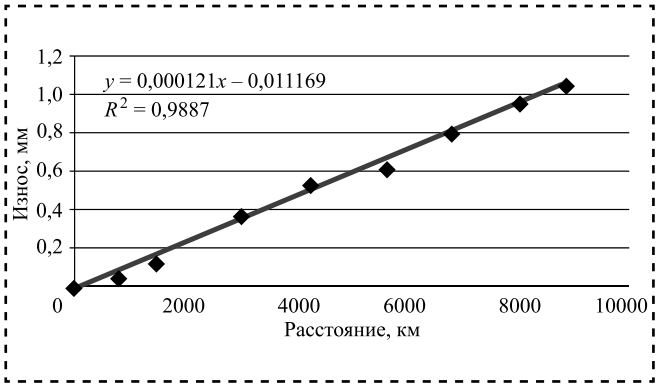

Рис. 6. Зависимость износа гребня колеса от пробега грузового вагона

Проведенное исследование дало возможность спрогнозировать износ гребня колеса грузового вагона, эксплуатирующегося на полигоне Транссибирской магистрали.

Методом наименьших квадратов аппроксимировали эмпирические данные по износам гребней линейной функции вида

$$y = ax + b, \qquad (2)$$

где x — наработка вагона, км.

В результате получена функция, определяющая зависимость износа гребня колеса от наработки вагона

$$y = 0{,}000121x - 0{,}011169.$$

Эмпирические значения в сравнении с теоретической прямой представлены на рис. 6.

Выводы

Удельный износ гребней колес платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров на полигоне Транссибирской магистрали 0,11 мм на 1000 км пробега.

Наработка вагона до предельного износа гребня колеса (с 33 до 25 мм) — 70...80 тыс. км. С учетом того, что межремонтный ресурс вагона составляет 160 тыс. км, отказ вагона между плановыми ремонтами по износу гребня колеса можно считать достоверным событием.

Результаты исследования раскрывают свойство предсказуемости проведения текущего отцепочного ремонта вагона по предельному износу гребня колеса. Используя полученные результаты исследования, современные информационные ресурсы и существующую систему диагностики, возможна организация текущего отцепочного ремонта вагонов по принципу "точно и в срок".

Библиографический список

1. **Гмурман В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие. М.: Высшее образование, 2008. 404 с.

2. **Петровых В.А., Гордиенко И.А., Налабордин Д.Г.** Износ гребня. Итоги эксперимента // Инженерная деятельность ИДЕЯ. 2015. № 1. С. 11—15.

УДК 621.7

В.А. Полетаев, *д-р техн. наук*
(Ивановский государственный энергетический университет),
А.В. Топоров, **А.А. Покровский**, **В.П. Зарубин**, *канд-ты техн. наук*
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Разработка новых конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений

Рассмотрены новые конструкции комбинированных магнитожидкостных уплотнений, которые позволят решить задачу повышения работоспособности техники, продления ее срока службы и снижения эксплуатационных расходов.

We consider the new design of the combined magnetic fluid seals, which can solve the problem of increasing efficiency technology, the extension of its service life and reduce operating costs.

Ключевые слова: контактные уплотнения, бесконтактные уплотнения, магнитная индукция, комбинированное уплотнение, магнитная жидкость, магнит.

Keywords: seals, non-contact seal, the magnetic induction, the combined seal, magnetic fluid, magnet.

Часто работоспособность целого агрегата зависит от работоспособности уплотнительного устройства, поэтому повышение эксплуатационных параметров уплотнений, их безотказность и долговечность — один из путей повышения надежности и долговечности технических систем.

Для герметизации вращающихся валов применяют целый ряд уплотнительных устройств, имеющих свои достоинства и недостатки [5, 6]. К недостаткам контактных уплотнений относят: высокие потери на трение, высокий момент сопротивления, наличие утечек. Использование смазочного материала не всегда позволяет решить проблемы, связанные с трением, поскольку необходимо удержание смазки в зоне контакта рабочих частей уплотнения с валом. Бесконтактные уплотнения имеют низкий момент трения, малый износ рабочих элементов, однако им присущи некоторые недостатки: малый удерживаемый перепад давлений, принципиальная негерметичность (щелевые, лабиринтные уплотнения), повышенные требования к точности изготовления, необходимость обеспечения постоянства рабочего зазора (магнитожидкостные уплотнения), что требует установки дополнительных опорных подшипников и приводит к увеличению габаритов узла [1].

Комбинированные уплотнения рационально сочетают рабочие характеристики контактных и магнитожидкостных уплотнений и взаимно компенсируют их недостатки. В комбинированных уплотнениях магнитная жидкость может применяться не только как уплотнительная среда, но и в качестве смазочного материала для смазки трущихся частей уплотнительных устройств [2].

Актуальной задачей является разработка новых конструкций комбинированных уплотнительных устройств.

Среди применяемых в настоящее время контактных уплотнений широко распространены торцевые уплотнения, которые состоят в основном из трех элементов: двух колец (вращающегося и неподвижного), образующих плоскую пару трения, и упругого элемента, обеспечивающего контакт в паре трения. Трущиеся части торцевого уплотнения смазываются при помощи магнитной жидкости [2]. В этом случае магнитная жидкость удерживается в области трения магнитными силами, возникающими при наложении магнитного поля. Для создания магнитного поля в уплотнение устанавливают магнитную систему. Выбрать наиболее рациональную конструкцию магнитной системы можно на основании ее магнитного расчета.

Основными результатами расчета магнитного поля являются распределение магнитной индукции и картина магнитного поля. По этим параметрам проводят оценку магнитной системы уплотнения.

Критериями оценки являются:

— максимальная величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения;

— распределение магнитного поля в рабочей зоне уплотнения.

Применительно к комбинированным уплотнениям наиболее важным для достижения результата является именно удержание магнитной жидкости в области трения (второй критерий). Максимальная магнитная индукция в рабочей области, достаточная для удержания магнитной жидкости, должна составлять 0,05...0,1 Тл [2].

Для герметизации объемов с низким и средним давлением предложена новая конструкция комбинированного торцевого магнитожидкостного уплотнения (рис. 1) [3].

Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита *1*, подвижного магнитопровода волнообразной формы *2*, примыкающего к постоянному магниту *1*. Магнит *1* и магнитопровод *2* закрепляются на втулке из эластомерного материала *3*. Во впадины подвижного магнитопровода *2* устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения *4*. Втулка *3* устанавливается на валу уплотняемого устройства *5*. В качестве неподвижного магнитопровода *6* используется деталь корпуса уплотняемого устройства. Магнитная жидкость *7* помещается в зазор между выступами подвижного магнитопровода *2* и неподвижным магнитопроводом *6*.

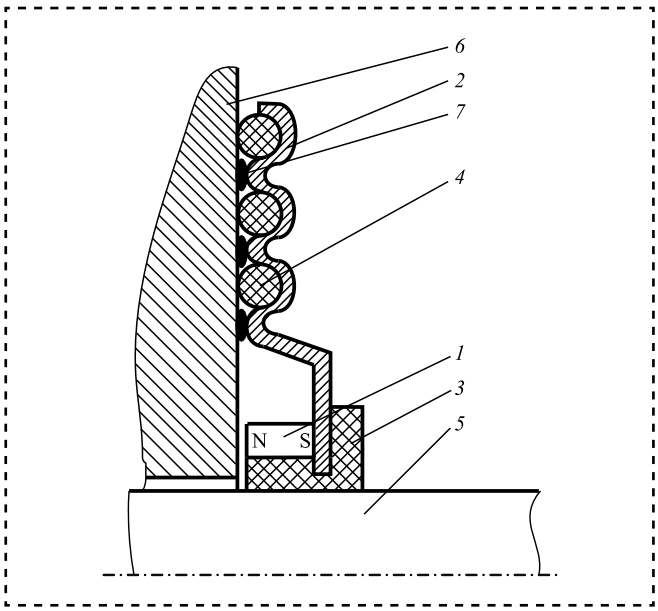

Рис. 1. Комбинированное торцевое магнитожидкостное уплотнение:

1 — кольцевой постоянный магнит; *2* — подвижный магнитопровод волнообразной формы; *3* — втулка; *4* — кольца из немагнитного материала; *5* — вал уплотняемого устройства; *6* — неподвижный магнитопровод; *7* — магнитная жидкость

Кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между корпусом уплотняемого устройства и выступами подвижного магнитопровода под действием магнитных сил, чем обеспечивается необходимый рабочий зазор уплотнения. В то же время возникающие магнитные силы препятствуют перемещению подвижного магнитопровода в направлении корпуса.

Расчет магнитного уплотнения проводили с использованием программного комплекса, реализующего метод конечных элементов для магнитных задач (рис. 2). Линии магнитного потока (рис. 2, *а*) концентрируются в рабочей области уплотнения. Максимальная магнитная индукция (рис. 2, *б*) достигает 0,2 Тл, что достаточно для удержания магнитной жидкости в рабочей зоне уплотнения.

Несмотря на решение проблемы удержания магнитной жидкости в зоне трения и обеспечение постоянства рабочего зазора такое уплотнение не может применяться для герметизации радиальных зазоров.

На рис. 3 представлена схема радиального комбинированного магнитожидкостного уплотнения вала [4]. Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита *1*, магнитопроводов волнообразной формы *2*, примыкающих к постоянному магниту *1*. Магнит *1* и магнитопроводы *2* закрепляются во втулке из эластомерного материала *3*. Во впадины магнитопроводов *2* устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения *4*. Втулка из эластомерного материала *3* устанавливается в корпус уплотняемого устройства *5*. В качестве подвижного магнитопровода *6* используется вал уплотняемого устройства. Магнитная жидкость *7* находится в зазоре между выступами магнитопроводов волновой формы *2* и валом *6*.

Аналогично предыдущей конструкции кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между валом и выступами магнитопроводов, возникающим в результате несоосности вала, вибраций и по другим причинам. При этом перемещения магнитопроводов компенсируются

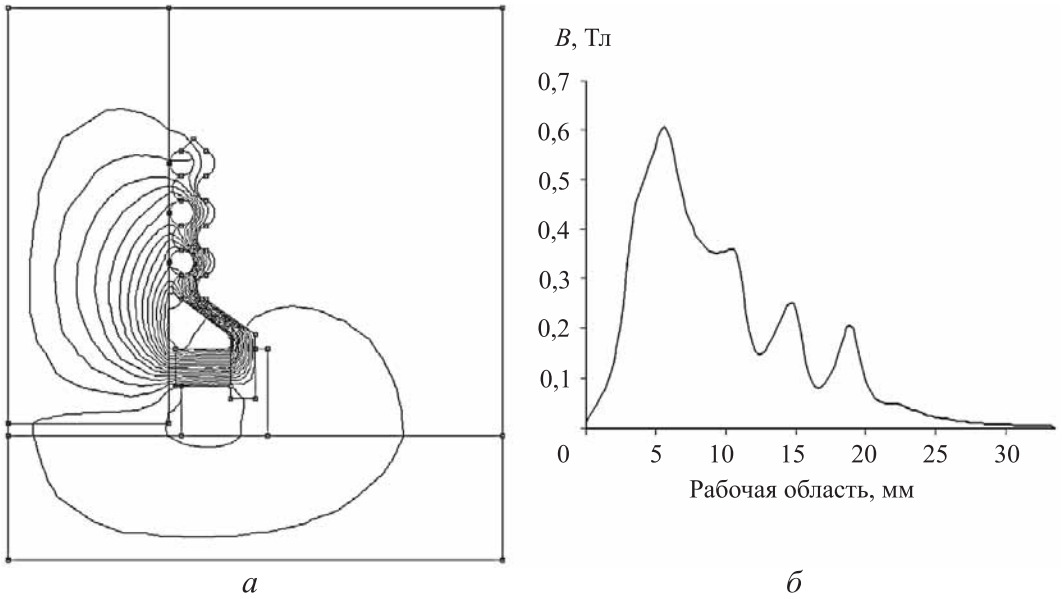

Рис. 2. Расчет магнитного уплотнения:
а — картина магнитного поля; *б* — распределение магнитной индукции в рабочей области уплотнения

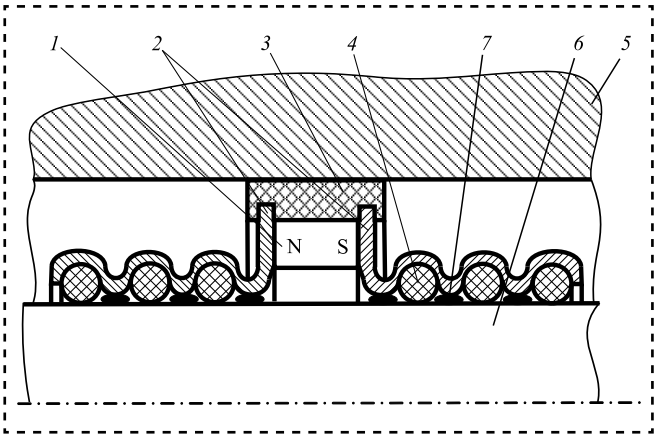

Рис. 3. Комбинированное торцевое магнитожидкостное уплотнение:
1 — кольцевой постоянный магнит; *2* — магнитопровод волнообразной формы; *3* — втулка; *4* — кольца из немагнитного материала; *5* — корпус уплотняемого устройства; *6* — вал уплотняемого устройства; *7* — магнитная жидкость

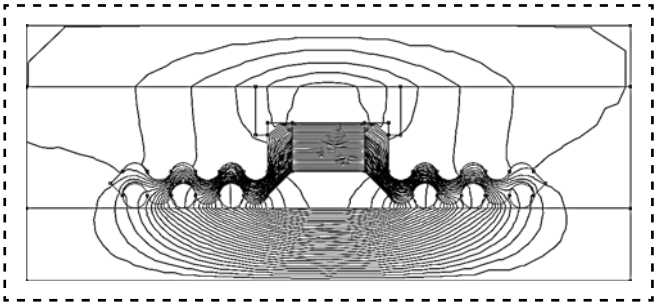

Рис. 4. Картина магнитного поля

за счет упругих свойств втулки из эластомерного материала.

При расчете уплотнения линии магнитного потока в рабочем зазоре концентрируются на волнообразных выступах магнитопроводов волнообразной формы, обращенных к валу (рис. 4). Магнитная индукция в рабочем зазоре составляет 0,25 Тл. Уплотнение обеспечивает удержание определенного перепада давлений, зависящего от числа волнообразных выступов и параметров магнитной системы. Удерживаемая в рабочей области уплотнения магнитная жидкость выступает в качестве смазки колец из немагнитного материала.

Особенностью предложенных конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений является необходимость использования постоянного магнита в качестве источника магнитного поля и магнитопроводов для создания магнитного поля в рабочей области уплотнения.

Исключение постоянного магнита и магнитопроводов из конструкции уплотнения позволит значительно уменьшить его габариты при сохранении основных рабочих характеристик. На рис. 5 представлена конструкция комбинированного магнитожидкостного уплотнения в сборе. Уплотнение содержит кольца из магнитоэластомерного материала *1*, сепаратор *2*, изготов-

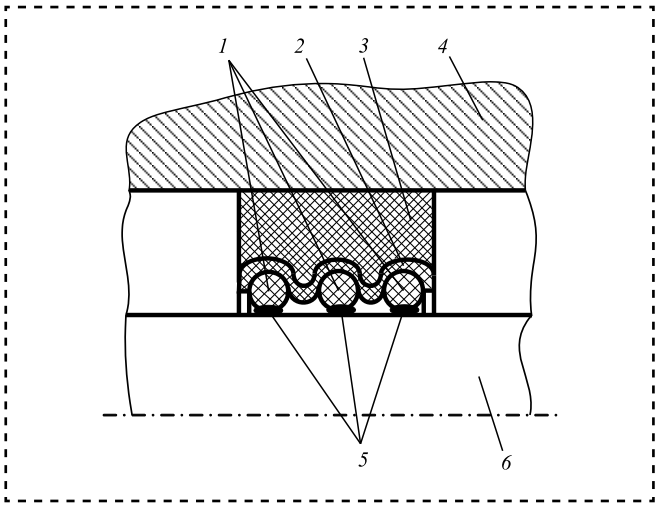

Рис. 5. Комбинированное магнитожидкостное уплотнение в сборе:
1 — кольца магнитного эластомерного материала; *2* — сепаратор; *3* — втулка; *4* — корпус уплотняемого устройства; *5* — магнитная жидкость; *6* — вал

ленный из пластмассы и имеющий кольцевые волнообразные изгибы круглого профиля, установлен во втулку *3* из эластомерного материала и помещенную в корпус *4* уплотняемого устройства. Магнитная жидкость *5* находится между валом *6* и кольцами из магнитоэластомерного материала *1* и удерживается там магнитными силами.

Возникающие перемещения сепаратора, как и в предыдущем случае, компенсируются за

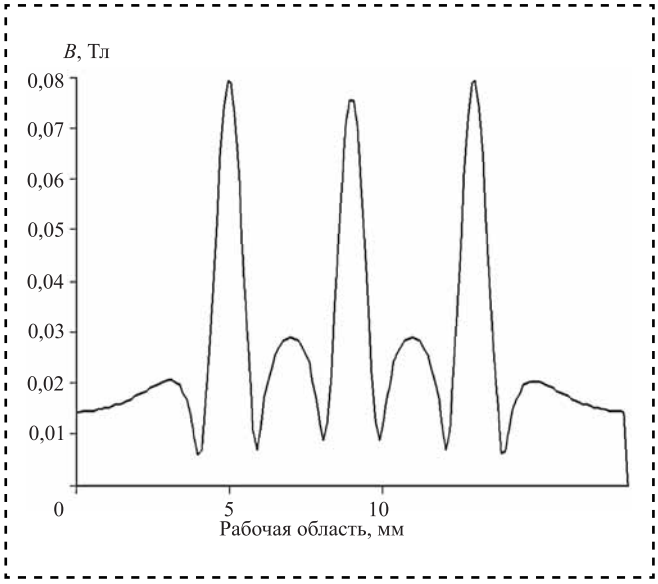

Рис. 6. Распределение магнитной индукции в рабочей области

счет упругих свойств эластомерного материала втулки. Магнитная жидкость концентрируется в зоне контакта колец из магнитоэластомерного материала с валом, где магнитная индукция составляет 0,08 Тл (рис. 6), образуя герметичные кольцевые пробки.

Перепад давлений, удерживаемый уплотнением, определяется суммой перепадов всех магнитожидкостных пробок. Так же магнитная жидкость выступает в качестве смазки при трении между кольцами из магнитоэластомерного материала и валом.

Выводы

Разработанное комбинированное магнитожидкостное уплотнение будет иметь меньшие габаритные размеры, по сравнению с представленными конструкциями. Конструкции комбинированных магнитожидкостных уплотнений позволят решить задачу повышения работоспособности техники, продлить срок службы, снизить эксплуатационные расходы.

Библиографический список

1. **Магнитные** жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов и др.: под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.

2. **Топоров А.В.** Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений и исследование их трибологических характеристик: дис. ... канд. техн. наук. Иваново. 2000. 175 с.

3. **Топоров А.В., Топорова Е.А., Пучков П.В.** Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение: пат. на полезную модель RU 88407 U1. 22.05.2009.

4. **Топоров А.В., Малый И.А., Потемкина О.В. и др.** Комбинированное магнитожидкостное уплотнение вала: пат. на полезную модель RU 135048 U1. 20.06.2013.

5. **Уплотнения** и уплотнительная техника: справочник / А.А. Кондаков и др.; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

6. **Киселев В.В., Топоров А.В., Пучков П.В.** Перспективы применения магнитожидкостных устройств в пожарной и аварийно-спасательной технике // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. № 2. С. 63—64.

УДК 621.501

М.Я. Израилович, *д-р техн. наук*, **Б.М. Эрлих,** *канд. техн. наук,* **А.В. Рочагов**
(ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: uliaerlich@mail.ru

Активное гашение фрикционных автоколебаний с учетом запаздывания виброгасящго воздействия

Рассмотрена механическая система с источником автоколебаний в виде отрицательного сухого трения. Силовое виброгасящее воздействие определено как функция текущих значений координаты и скорости системы и обеспечивает заданную малую амплитуду автоколебаний. Показано, что при наличии запаздывания в цепи обратной связи снижается качество виброгашения (вплоть до негативного эффекта). Приведен принцип построения виброгасящего воздействия, реализующего компенсацию временного запаздывания и результаты компьютерного моделирования, показывающие эффективность такого воздействия.

The self oscillating system with source of vibration in shape of negative dry friction is considered. The force vibroextinguishing influence is defined as function the current values of coordinate and speed of system and provides the given small amplitude of self oscillations. It is shown, that at taking in account time delay in feedback force quality of vibroextinguishing decreases. The principle of creation of the vibroextinguishing influence realizing compensating of temporal delay is given. The result is confirmed with computer simulation.

Ключевые слова: автоколебательная система с отрицательным сухим трением, силовое виброгасящее воздействие, запаздывание, амплитуда, компьютерное моделирование.

Keywords: self oscillating system, negative dry friction, forcing vibroextinguishing influence, time delay in feedback force, amplitude, computer simulation.

Задачи активного гашения фрикционных автоколебаний с использованием силового воздействия рассмотрены в ряде работ [1, 2].

При этом силовое виброгасящее воздействие определяется как мгновенная (т.е. без учета временного запаздывания) функция координаты системы $x(t)$ и ее скорости $\dot{x}(t)$. В реальных системах всегда имеет место некоторое запаздывание, т.е. в действительности силовое виброгасящее воздействие может быть определено как функция величин $x(t-\tau)$, $\dot{x}(t-\tau)$, где τ — временное запаздывание.

В силу этого периодический режим и его амплитуда отличаются от расчетного оптимального (квазиоптимального) режима, что приводит к снижению эффективности активного виброгашения. Возможна такая коррекция параметров виброгасящего воздействия с учетом наличия запаздывания, которая полностью компенсирует его наличие, тем самым в системе реализуется расчетный режим с минимальной амплитудой колебаний.

Рассмотрим такую задачу на примере простейшей автоколебательной системы с отрицательным сухим трением.

Уравнение динамики системы имеет вид:

$$M\ddot{x} + K\dot{x} + Cx - a\,\mathrm{sign}(\dot{x}) = 0, \qquad (1)$$

где $M\ddot{x}$ — инерционная сила;

M — масса системы;

$\ddot{x}$ — ускорение;

$K\dot{x}$ — сила вязкого демпфирования;

K — коэффициент вязкого демпфирования;

Cx — упругая сила;

C — коэффициент упругости;

a — коэффициент пропорциональности отрицательного сухого трения.

Уравнение (1) преобразуем к виду:

$$\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2 x - \mu\,\mathrm{sign}(\dot{x}) = 0; \qquad (2)$$

$$2k = \frac{K}{M};\ \omega_0^2 = \frac{C}{M};\ \mu = \frac{a}{M}.$$

В гармоническом приближении амплитуду установившихся колебаний определяем по формуле:

$$A_0 = \frac{2\mu}{\pi k \omega_0}. \qquad (3)$$

Частота автоколебаний $\omega = \omega_0$.

При малом демпфировании k амплитуда A_0 достигает значительных величин. Для снижения амплитуды A_0 до $A^* < A_0$ (а также, если это требуется из технологических соображений, в определенных пределах коррекции $\omega \neq \omega_0$) в систему вводят силовое виброгасящее воздействие с обратной связью $u^*(x, \dot{x})$:

$$\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2 x - \mu \operatorname{sign}(\dot{x}) = u^*(x, \dot{x}), \qquad (4)$$

где

$$u^*(x, \dot{x}) = \left(\omega_0^2 - \omega^2\right) x(t) + \left(2k - \frac{4\mu}{\pi\omega A^*}\right)\dot{x}(t). \qquad (5)$$

На рис. 1 представлены результаты расчетов решений уравнения (4) с законом виброгашения (5).

При отсутствии виброгасящего воздействия амплитуду колебаний системы (2) определяют по формуле (3): $A_0 \approx 3{,}4$. Использование силового виброгасящего воздействия (5) позволяет снизить амплитуду автоколебаний до заданной величины и скорректировать их частоту.

Однако в реальных системах измерение $x(t)\dot{x}(t)$ обусловливает введение их в виброгасящее воздействие u^* (5) с некоторым временным запаздыванием τ:

$$u^*\left(x(t-\tau),\ \dot{x}(t-\tau)\right) = \left(\omega_0^2 - \omega^2\right) x(t-\tau) + \left(2k - \frac{4\mu}{\pi\omega A^*}\right)\dot{x}(t-\tau). \qquad (6)$$

Наличие запаздывания приводит к значительному снижению эффективности виброгашения, а в некоторых случаях и к увеличению амплитуды автоколебаний.

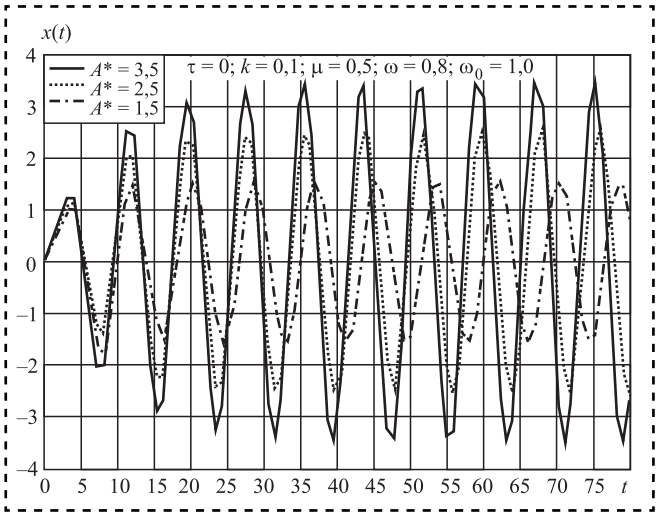

Рис. 1. Решение уравнения (4) при использовании виброгасящего воздействия (5)

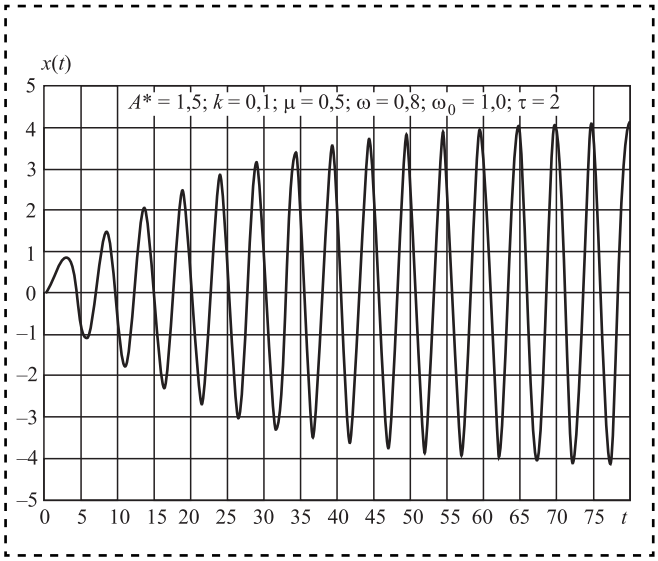

Рис. 2. Решение уравнения (5) с законом виброгасящего воздействия (6)

На рис. 2 представлен график решения уравнения (4) с законом управления (6) при $A^* = 1{,}5$. В данном случае амплитуда колебаний $A > 4$ превосходит как $A_0 = 3{,}4$ для системы без виброгасящего воздействия, так и $A^* = 1{,}5$ для системы с виброгасящим воздействием без учета временного запаздывания.

Для устранения такого существенного дефекта системы виброгасящего воздействия закон u^* (6) должен быть скорректирован таким образом, чтобы имела место компенсация запаздывания.

Закон u^* (5) определен в первом гармоническом приближении:

$$x = A\sin\psi;\ \ \dot{x} = A\cos\psi,$$

где A — искомая амплитуда;

$\psi = \omega t + \varphi$ — полная фаза колебаний;

φ — начальная фаза.

Тогда выражение (5) может быть записано как функция ψ в следующем виде:

$$u^*(\psi) = A\left(a_1 \sin\psi + a_2 \cos\psi\right), \qquad (7)$$

где $a_1 = \omega_0^2 - \omega^2$;

$$a_2 = \left(2k - \frac{4\mu}{\pi\omega A^*}\right).$$

С учетом запаздывания:

$$x(t-\tau) = A\sin(\omega t + \varphi - \omega\tau) = A\sin(\psi - \omega\tau) = A(\sin\psi\cos\omega\tau - \cos\psi\sin\omega\tau); \qquad (8)$$

$$\dot{x}(t-\tau) = \omega A\cos(\psi - \omega\tau) = \omega A(\cos\psi\cos\omega\tau + \sin\psi\sin\omega\tau). \qquad (9)$$

В результате подстановки выражений (8), (9) в (6) получим:

$$u_\tau(\psi) = A\left[(a_1\cos\omega\tau + a_2\sin\omega\tau)\sin\psi + \right.$$
$$\left. + (a_2\cos\omega\tau - a_1\sin\omega\tau)\cos\psi\right]. \quad (10)$$

Расчетное оптимальное виброгасящее воздействие u^* (7) и воздействие с учетом запаздывания u_τ (10) как функции ψ (а следовательно, и как функции времени t) при достаточно больших значениях τ существенно отличаются между собой, это обуславливает неэффективность виброгашения при наличии запаздывания.

Для устранения этого эффекта следует скомпенсировать влияние запаздывания.

С этой целью формируется следующее виброгасящее воздействие:

$$u_\tau = \gamma_1 x(t-\tau) + \frac{\gamma_2}{\omega}\dot{x}(t-\tau), \quad (11)$$

где γ_1, γ_2 — константы, подлежащие определению таким образом, чтобы u_τ как функция ψ совпадала с оптимальным законом (7).

В результате подстановки выражений $x(t-\tau)$ (8) и $\dot{x}(t-\tau)$ (9) в формулу (11) и приравнивания выражения $u^*(\psi)$ (7) и u_τ (11) получим систему двух алгебраических уравнений относительно γ_1, γ_2:

$$\gamma_1^* = \left(\omega_0^2 - \omega^2\right)\cos\omega\tau - \left(2k - \frac{4\mu}{\pi\omega A^*}\right)\sin\omega\tau; \quad (12)$$

$$\gamma_2^* = \left(\omega_0^2 - \omega^2\right)\sin\omega\tau + \left(2k - \frac{4\mu}{\pi\omega A^*}\right)\cos\omega\tau. \quad (13)$$

С учетом (12), (13) закон виброгашения, как функция ψ, эквивалентный оптимальному закону (5) закон (7) определяется в виде:

$$u^*\left(x(t-\tau),\ \dot{x}(t-\tau)\right) = \gamma_1^* x(t-\tau) + \frac{\gamma_2^*}{\omega}\dot{x}(t-\tau). \quad (14)$$

На рис. 3 представлены результаты решения уравнения:

$$\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2 x - \mu\,\mathrm{sign}(\dot{x}) = u^*\left(x(t-\tau),\ \dot{x}(t-\tau)\right), \quad (15)$$

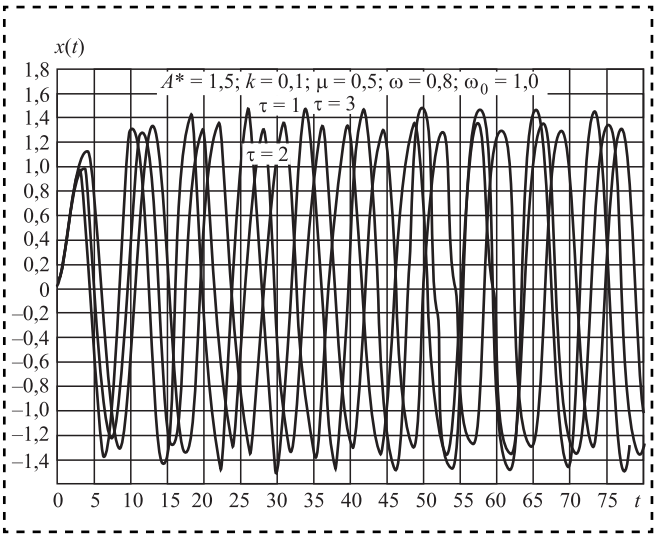

Рис. 3. Решение уравнения (15) с законом виброгасящего воздействия (14)

где $u^*\left(x(t-\tau),\ \dot{x}(t-\tau)\right)$ определяется по формулам (12)—(14).

Даже при большом запаздывании значения минимальной амплитуды автоколебаний весьма близки к расчетному значению A^*.

Выводы

1. На примере силового гашения автоколебаний в системе с отрицательным сухим трением показано, что запаздывание в цепи обратной связи виброгасящего воздействия снижает эффективность виброгашения (вплоть до негативного результата).

2. Изложен способ, позволяющий, при известном временном запаздывании полностью скомпенсировать эффект его наличия и обеспечить заданную малую амплитуду автоколебаний.

Библиографический список

1. **Израилович М.Я.** Синтез систем возбуждения квазигармонических автоколебаний. М.: URSS, 2011. 120 с.

2. **Израилович М.Я., Эрлих Б.М.** Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Спутник, 2015. 38 с.

УДК 621.83.061.1

М.С. Разумов, *канд. техн. наук,* **Д.С. Гридин**
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)
E-mail: mika_1984_@mail.ru, swsu.st@inbox.ru

Выбор технологической схемы сборки планетарного редуктора с шевронным зацеплением*

Приведены технологические схемы сборки планетарного редуктора с шевронным зацеплением. Схемы проанализированы в целях выбора лучшего варианта.

This article describes several technological schemes of planetary gear assembly with chevron gearing, the analysis of these schemes in order to select the best option.

Ключевые слова: планетарный редуктор, шевронное зацепление, передаточное отношение, частота вращения.

Keywords: planetary gear, herringbone gearing, gear ratio, rotating speed.

Планетарные редукторы применяют в различных отраслях промышленности, в связи с чем разработка новых эффективных конструкций редукторов является одной из приоритетных задач машиностроения [1].

На кафедре Машиностроительных технологий и оборудования Юго-Западного государственного университета разработана конструкция планетарного редуктора с шевронным зацеплением (рис. 1, *а*).

Основным отличием предлагаемого планетарного редуктора от классических конструкций является использование колес с шевронным зацеплением. Используя планетарный редуктор при работе с высокими окружными скоростями, следует учитывать, что при вращении любой механизм создает вибрации, негативно влияющие на работу механизма в целом. Косозубое колесо при работе вызывает значительные осевые нагрузки, которые передаются на детали, входящие в состав передачи, поэтому для исключения осевых нагрузок в новой схеме планетарного редуктора применили шевронное зацепление. Благодаря встречному направлению угла наклона зубьев исключена возможность появления осевых нагрузок, повышена плавность работы механизма из-за большего числа зубьев, находящихся в зацеплении. Для простоты сборки и обслуживания шевронное колесо собирали соединением двух косозубых колес (рис. 1, *б*) с увеличенным углом наклона зубьев, что позволило передавать высокие крутящие моменты [2, 3].

Выбор метода сборки является неотъемлемой частью в проектировании различных механизмов, быстрота и эффективность процесса также влияют на ремонт и обслуживание того или иного вида изделия. Эти процессы подразумевают определенный алгоритм действий и позволяют оценить общую технологичность конструкции изделия.

Разрабатывая алгоритм сборки планетарного редуктора с шевронным зацеплением, на первом этапе выбирали первичный элемент (базовую деталь), характерным признаком которого является отсутствие разъемных и неразъемных соединений.

В дальнейшем при выборе последовательности учитывали, что в передаче применяется шевронное зацепление со встречным направлением угла наклона зубьев (см. рис. 1, *б*).

Обычно в качестве базовой детали применяют внутреннюю поверхность корпуса, которая

* Работа выполнена при финансовой поддержке по договору № 6394ГУ/2015 по теме "Разработка планетарного редуктора с шевронным зацеплением".

жестко фиксирует одно из колес передачи. Поскольку в нашем случае большая часть элементов передачи имеет разборную конструкцию, то в качестве такой поверхности выбрана поверхность крышки корпуса редуктора. Прежде чем выбрать окончательный вариант, рассмотрели все возможные алгоритмы сборки для подобного вида передач и сравнили их по критерию технологичности.

На рис. 2 изображен упрощенный вид планетарного редуктора с шевронным зацеплением в сборе. Цифрами в порядке расположения от солнечного колеса к корончатому обозначены элементы передачи, которые необходимо в определенной последовательности соединить, чтобы обеспечить простоту в обслуживании и монтаже элементов передачи. При составлении последовательности учитывали, что все элементы передачи имеют наклонный профиль зубьев, а оси сателлитов 1-й ступени неподвижны.

Разработаны три варианта алгоритмов сборки элементов передачи (цифры в скобках указывают на возможность монтажа элементов, находящихся в собранном виде).

Вариант 1. Сборка элементов передачи отдельно с последующим их монтажом в крышку и корпус. Последовательность действий: (*9*, *10*); *8*, *7*, *6*, (*3*, *4*), *5*, *1*, *2*:

— собираем корончатую шестерню *9*, *10*;

— на специальной оправке с двух сторон собираем сателлиты второй ступени *7*, *8* и устанавливаем их в корончатое колесо;

— устанавливаем первую половину промежуточного колеса *6*;

— на специальной оправке собираем сателлиты первой ступени *3*, *4* и устанавливаем их в ранее собранные элементы передачи;

— собираем промежуточное колесо, установив его вторую часть *5*;

— собираем входной вал с первой половиной солнечного колеса *1*, устанавливаем его в крышку и соединяем с ранее собранными элементами передачи;

— собираем солнечное колесо, присоединив оставшуюся шестерню *2*;

— демонтируем оправки с осей сателлитов и устанавливаем водило второй ступени;

— монтируем полученную сборку в корпус.

Достоинства схемы: возможность установки некоторых элементов передачи уже в сборе — сохранение необходимой точности позиционирования заранее отрегулированных на специальном приспособлении шестерен, что положительно отразится на технических характеристиках редуктора. Недостатки схемы: наличие

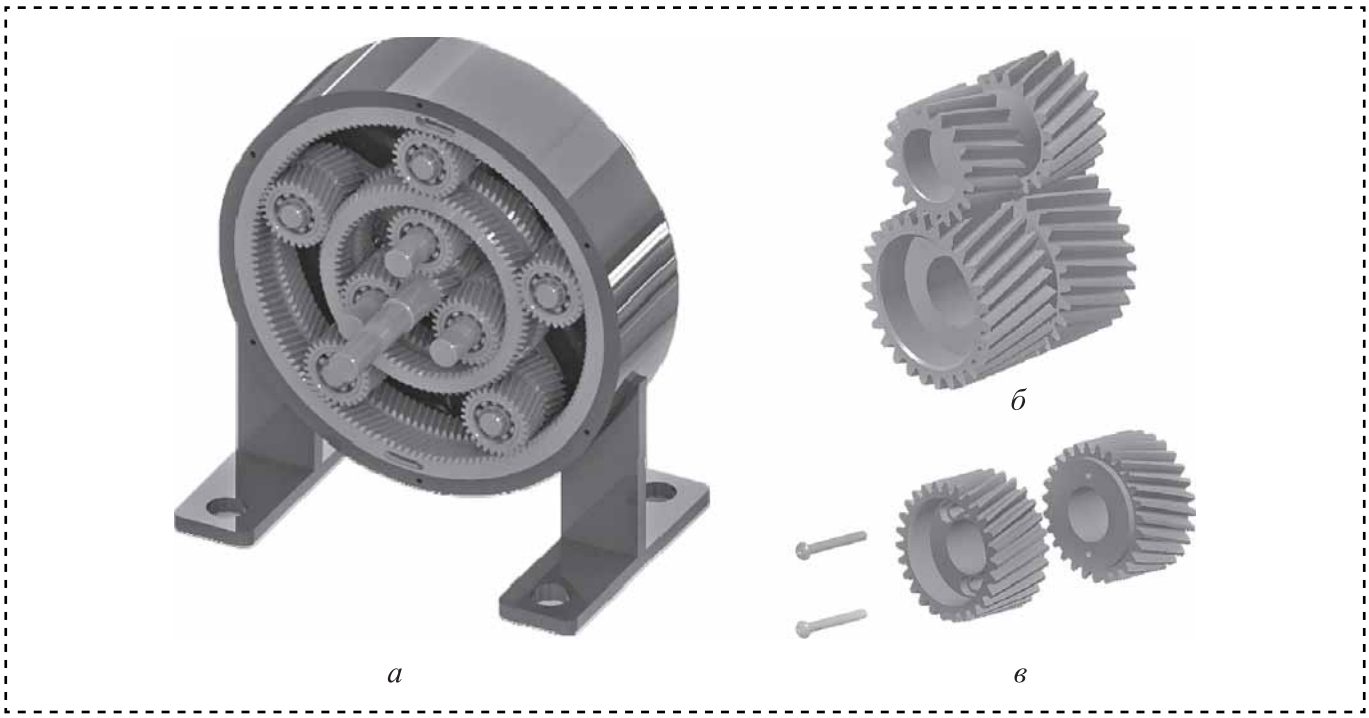

Рис. 1. Планетарный редуктор:
а — общий вид со снятой крышкой; *б* — шевронное зацепление; *в* — разнесенные сателлиты планетарного редуктора с шевронным зацеплением

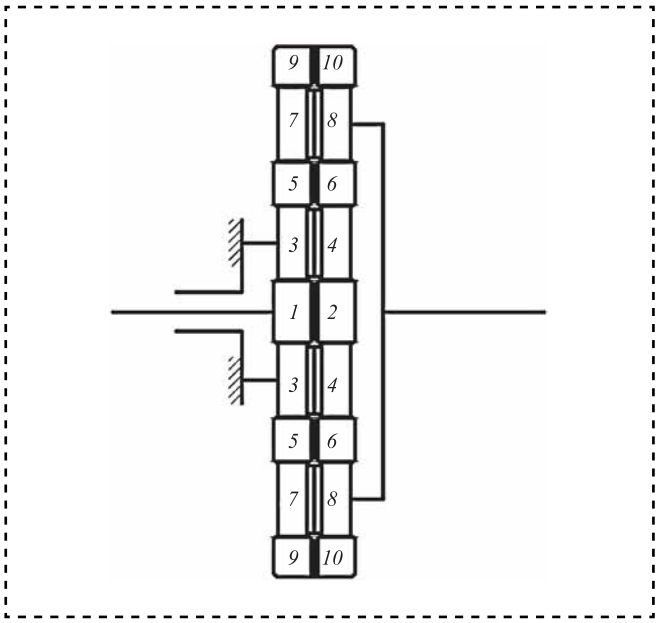

Рис. 2. Упрощенный вид планетарного редуктора с шевронным зацеплением в сборе:
1 — 1-я половина солнечного колеса; *2* — 2-я половина солнечного колеса; *3* — 1-я половина сателлитов 1-го порядка; *4* — 2-я половина сателлитов 1-го порядка; *5* — 1-я половина промежуточного колеса; *6* — 2-я половина промежуточного колеса; *7* — 1-я половина сателлитов 2-го порядка; *8* — 2-я половина сателлитов 2-го порядка; *9* — 1-я половина корончатого колеса; *10* — 2-я половина корончатого колеса

при сборке специальных ориентирующих оправок для каждой ступени сателлитов.

Вариант 2. Сборка элементов передачи непосредственно в корпус. Последовательность действий: *10*, (*8*, *6*, *7*), *9*, *1*, *3*, *5*, *2*, *4*:

— устанавливаем первую половину корончатого колеса *10* в корпус;

— на водиле второй ступени устанавливаем первую половину сателлитов *8* и первую половину промежуточного колеса *6*, собираем сателлиты, соединив их колесами *7*. Монтируем полученную сборку в корпус;

— собираем корончатое колесо, установив его вторую часть *9*;

— собираем входной вал с первой половиной солнечного колеса *1*, установив его в крышку;

— на установленные в крышке оси монтируем первую половину сателлитов первой ступени *3*;

— устанавливаем вторую часть промежуточного колеса *5* в крышку;

— собираем сателлиты первой ступени и солнечное колесо, установив оставшиеся элементы *4*, *2*;

— устанавливаем полученную сборку в корпус, параллельно с этим соединив две части промежуточного колеса.

Достоинства схемы: отсутствие специальных оправок. Недостатки схемы: наибольшая трудоемкость при сборке, высокая погрешность при монтаже, низкая точность при сборке и регулировании отдельных элементов передачи.

Вариант 3. Сборка элементов передачи в крышку с последующим монтажом в корпус. Последовательность действий: *1*, *3*, *5*, *4*, *2*, (*7*, *8*, *9*, *10*), *6*:

— собираем входной вал с первой половиной солнечного колеса *1*, устанавливаем его в крышку;

— на смонтированные в крышке оси устанавливаем первую половину сателлитов *3*;

— устанавливаем вторую половину промежуточного колеса *5* в крышку;

— собираем сателлиты первой ступени, соединив их колесами *4*;

— собираем солнечное колесо, установив его вторую часть *2*;

— собираем корончатое колесо *9*, *10*;

— на специальной оправке с двух сторон собираем сателлиты второй ступени *7*, *8* и устанавливаем их в корончатое колесо;

— устанавливаем полученную сборку в крышку;

— собираем промежуточное колесо, соединив его второй половиной *6*;

— демонтируем оправку сателлитов второй ступени и устанавливаем водило;

— монтируем полученную сборку в корпус.

Достоинства схемы: элементы передачи последовательно устанавливают на крышку, что значительно облегчает сборку. Недостатки схемы: тратится больше времени на сборку, невозможность установки некоторых элементов передач в сборе увеличивает трудоемкость при регулировке.

Вывод

Наиболее технологичной по времени сборки и простоте обслуживания является алгоритм сборки, соответствующий варианту 1.

Библиографический список

1. **Разумов М.С., Гридин Д.С., Дубовой А.Ю.** Повышение конструктивных возможностей планетарных передач // Современные инструментальные материалы, информационные технологии и инновации: сб. науч. трудов. Курск, 2015. С. 362—366.

2. **Razumov M.S., Gridin D.S.** Planetary reducer with herringbone gear // Metallurgical and Mining Industry. 2016. No 5. С. 90—94.

3. **Разумов М.С., Дубовой А.Ю., Сидорова В.В. и др.** Двухступенчатый планетарный механизм с шевронным зацеплением: пат. на полезную модель RUS 160125, заяв. 15.05.2015, опубл. 10.03.2016 г.

УДК 621.822.57-229.331

В.И. Шаломов, *канд. техн. наук*
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: seu@knastu.ru

Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков (ч. 2)

Рассмотрены результаты численного исследования влияния конструктивных и режимных особенностей частично пористых газостатических опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих шлифовальных станков при работе в статическом и гибридном режимах. В качестве определяющего геометрического параметра для расчетного анализа выбрано число пористых вставок во вкладыше газовой опоры.

The results numerical study of influence of constructive and operational peculiarities of partially porous gas-static bearings on operational characteristics the spindle assemblies of metal-working grinders are considered during the work in the static and hybrid modes. As the defining geometric size for numerical analysis a selected quantity of porous inserts in the liner of a gas support.

Ключевые слова: металлообрабатывающий станок, шпиндельный узел, газостатические опоры, пористые вставки, эксплуатационные характеристики шпиндельного узла, конструктивный параметр, число сжимаемости, несущая способность и удельный момент опоры, нагрузка и жесткость на консоли шпинделя, угол ориентации нагрузки.

Keywords: machine tool, spindle unit, gas-static support, a porous insert, the operational characteristics of spindle unit with a design parameter, the number of compressibility, bearing capacity and specific support point, the load and the rigidity in the spindle, the orientation angle of the load dependency graphs.

Высокую несущую способность и жесткость смазочного слоя среди газовых опор имеют пористые радиальные подшипники с внешним наддувом газа, которые впервые описаны в работе [1]. Они менее склонны к потере устойчивости по сравнению с различными конструкциями газовых подшипников, но для них характерен большой расход сжатого воздуха, приводящий к повышенному потреблению энергии заводскими компрессорами. Возрастают требования к выбору специального прочного пористого материала для изготовления таких подшипников. Газостатические опоры с пористыми вставками обеспечивают необходимую нагрузку и жесткость на шлифовальном круге. От выбора формы, размеров, числа и расположения вставок в металлическом вкладыше подшипника наряду с другими конструктивными и режимными параметрами зависят эксплуатационные характеристики шпиндельного узла (ШУ).

Сочетание конструктивных и режимных параметров ШУ позволяет осуществить высокую точность шлифования деталей и узлов технологических машин.

В качестве основных эксплуатационных характеристик ШУ для исследования приняты относительная нагрузка $\bar{F}$ на консоли шпинделя, коэффициент несущей способности опор C_Q, коэффициент жесткости $k_{\bar{F}}$, удельный момент подшипника $\bar{M}$ и для комбинированного режима дополнительно — угол ориентации нагрузки ψ [2]. Расчеты эксплуатационных характеристик ШУ выполняли для двух режимов работы шпинделя: в статическом (режиме подвеса) и гибридном (комбинированном).

Влияние числа пористых вставок в газовых опорах на эксплуатационные характеристики ШУ

Анализ эксплуатационных характеристик ШУ выполняли для подшипников с числом пористых вставок в одном ряду наддува $N_{вст}$, равным 4, 6 и 8. Развертка газостатической опоры с шестью пористыми вставками в одном ряду наддува показана на рис. 1. Постоянные параметры: относительное давление наддува $\bar{p}_S = 1/6$; относительный эксцентриситет в передней опоре $\varepsilon_1 = 0{,}6$; относительная длина передней опоры $\bar{L}_1 = 1{,}2$; относительная длина задней опоры $\bar{L}_2 = 1$; относительная раздвижка линий наддува $\bar{b} = 0{,}6$; относительная раздвижка подшипников $\bar{a} = 4$; относительный вылет шпинделя $\bar{l} = 1$; относительная длина вставки $t/a = 2$.

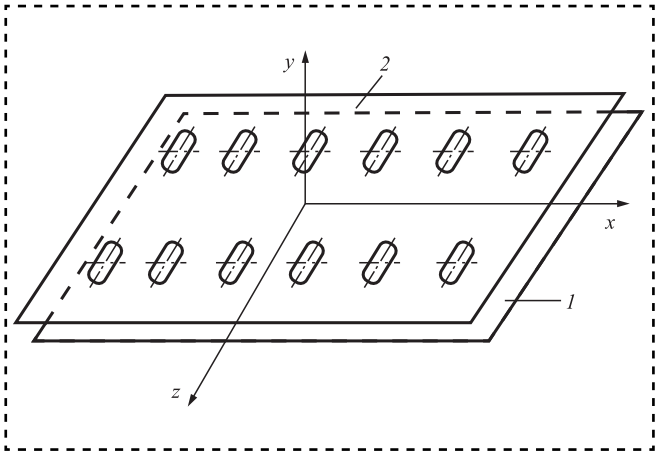

Рис. 1. Развертка поверхности газостатического подшипника с пористыми вставками шпоночной формы:
1 — поверхность шпинделя; *2* — поверхность вкладыша

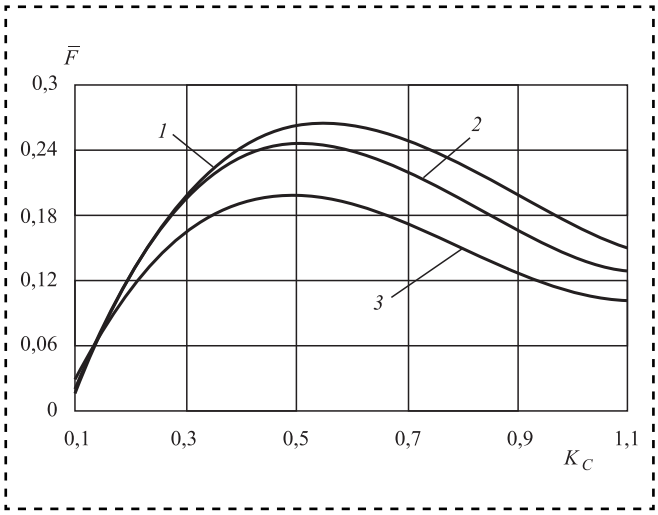

Рис. 2. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от конструктивного параметра K_C и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст} = 8$; *2* — $N_{вст} = 6$; *3* — $N_{вст} = 4$

Рассмотрим результаты численного исследования влияния числа пористых вставок на эксплуатационные характеристики ШУ при его работе в режиме подвеса. График изменения относительной нагрузки на консоли шпинделя от конструктивного параметра K_C [3] при вариативном числе вставок $N_{вст}$ показан на рис. 2.

Практически во всем диапазоне изменения конструктивного параметра наибольшая нагрузка $\bar{F}$ достигается при восьми вставках в ряду наддува, что является следствием увеличения общей площади пористой матрицы. Смещение вправо максимума графиков $\bar{F} = f\left(K_C, N_{вст}\right)$ при повышении числа вставок от 4 до 8 свидетельствует о том, что с ростом площади пористой поверхности средний радиальный зазор опоры может быть увеличен, а это улучшит демпфирующую способность смазочного слоя газовых подшипников. Прирост максимума нагрузки $\bar{F}$ при $K_C = 0{,}5...0{,}55$, связанный с изменением числа вставок: от $N_{вст} = 4$ до $N_{вст} = 6...20$ %, а от $N_{вст} = 6$ до $N_{вст} = 8$ только 5,7 %. Отсюда следует вывод, что рост нагрузки на шлифовальном круге заметно замедляется при увеличении числа вставок выше $N_{вст} = 6$. Графическая зависимость $C_Q = f(N_{вст}, K_C)$ представлена на рис. 3.

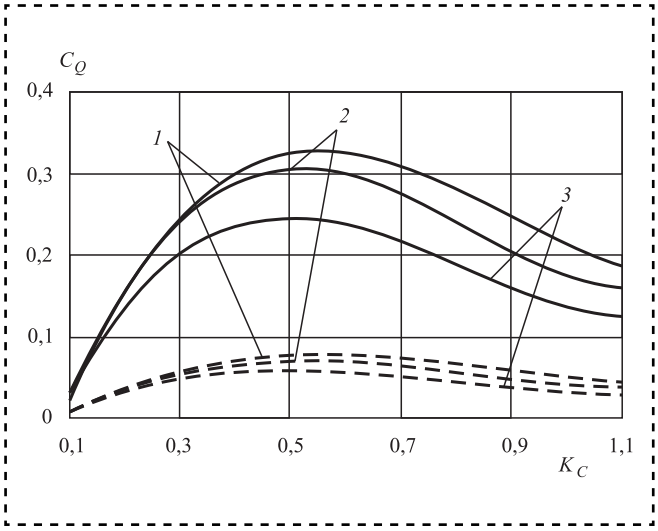

Рис. 3. Зависимость коэффициентов несущей способности опор C_Q от конструктивного параметра K_C и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст} = 8$; *2* — $N_{вст} = 6$; *3* — $N_{вст} = 4$; — передняя опора; – – – задняя опора

Качественная картина поведения несущей способности передней и задней опоры ШУ подтверждает закономерность изменения нагрузки на консоли шпинделя (см. рис. 3). При этом коэффициент несущей способности заднего подшипника при увеличении числа вставок от 4 до 8 изменяется слабо.

Зависимости $k_{\bar{F}} = f\left(N_{\text{вст}}, K_C\right)$ и $\bar{M} = f(N_{\text{вст}}, K_C)$ показаны на рис. 4 и 5 соответственно. Коэффициент жесткости на шлифовальном круге несущественно увеличивается при переходе от шести к восьми вставкам в ряду наддува газостатической опоры. При $K_C = 0{,}6$ коэффициент жесткости шпинделя на опорах с числом вставок $N_{\text{вст}} = 8$ выше, чем при $N_{\text{вст}} = 6$ только на 8 %. Тогда как рост $k_{\bar{F}}$ при увеличении числа вставок от 4 до 6 составляет 27 %.

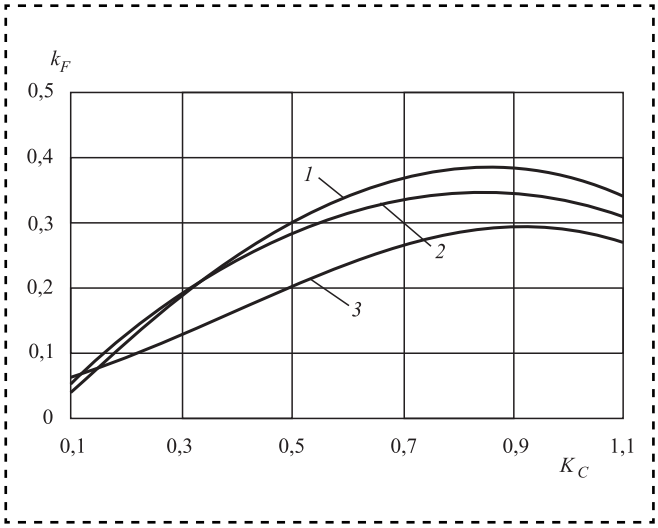

Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от конструктивного параметра K_C и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{\text{вст}} = 8$; *2* — $N_{\text{вст}} = 6$; *3* — $N_{\text{вст}} = 4$

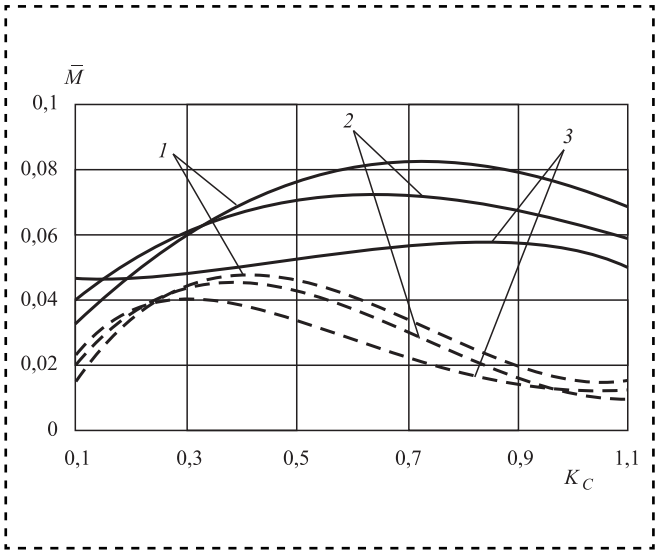

Рис. 5. Зависимость удельных моментов опор $\bar{M}$ от конструктивного параметра K_C и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{\text{вст}} = 8$; *2* — $N_{\text{вст}} = 6$; *3* — $N_{\text{вст}} = 4$; — передняя опора; - - - задняя опора

Аналогичные выводы можно сделать и по зависимости $\bar{M} = f\left(N_{\text{вст}}, K_C\right)$. Обратим внимание на существенную разницу в положении максимумов удельных моментов от перекоса в переднем и заднем подшипниках.

Исследование влияния числа пористых вставок $N_{\text{вст}}$ на эксплуатационные характеристики ШУ при его работе в гибридном режиме выполнили с числом вставок в ряду наддува 4, 6 и 8. Кроме числа вставок вариативной величиной является также число сжимаемости Λ [3].

Зависимости $\bar{F} = f\left(\Lambda, N_{\text{вст}}\right)$ и $C_Q = f(\Lambda,\ N_{\text{вст}})$ представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Анализ графиков для относительной нагрузки на консоли вала $\bar{F}$ показал, что в области невысоких значений числа сжимаемости повышение числа вставок до 8 ведет к росту нагрузочной способности ШУ. Это связано с превалирующим вкладом внешнего наддува в создание несущей способности переднего подшипника. С увеличением числа сжимаемости нагрузка на консоли вала $\bar{F}$ возрастает при всех значениях $N_{\text{вст}}$. Разницы в значениях $\bar{F}$ при $N_{\text{вст}} = 6$ и $N_{\text{вст}} = 8$ практически нет, поскольку при числе вставок

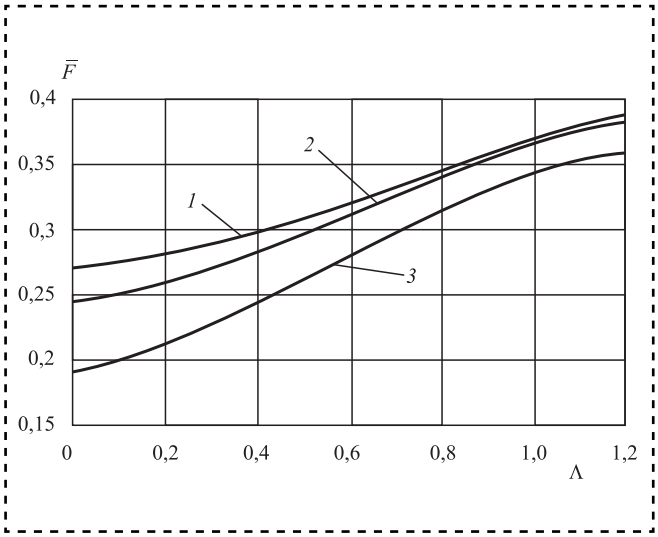

Рис. 6. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от числа сжимаемости Λ и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{\text{вст}} = 8$; *2* — $N_{\text{вст}} = 6$; *3* — $N_{\text{вст}} = 4$

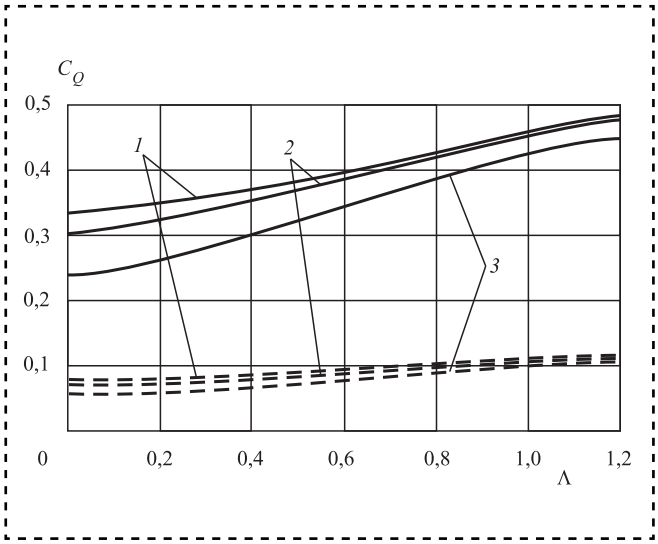

Рис. 7. Зависимость коэффициентов несущей способности опор C_Q от числа сжимаемости Λ и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст}$ = 8; *2* — $N_{вст}$ = 6; *3* — $N_{вст}$ = 4; — передняя опора; – – – задняя опора

$N_{вст}$ = 6 из-за меньшей пористой площади вкладыша более выражен эффект смазочного клина.

Внешний наддув и самогенерация давления в задней опоре выражены слабее, чем в передней (вследствие малых значений относительного эксцентриситета ε_2), и поэтому изменение числа вставок в этой опоре несущественно влияет на несущую способность (см. рис. 7).

Графики зависимостей $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, N_{вст})$ и $\overline{M} = f(\Lambda, N_{вст})$ показаны соответственно на

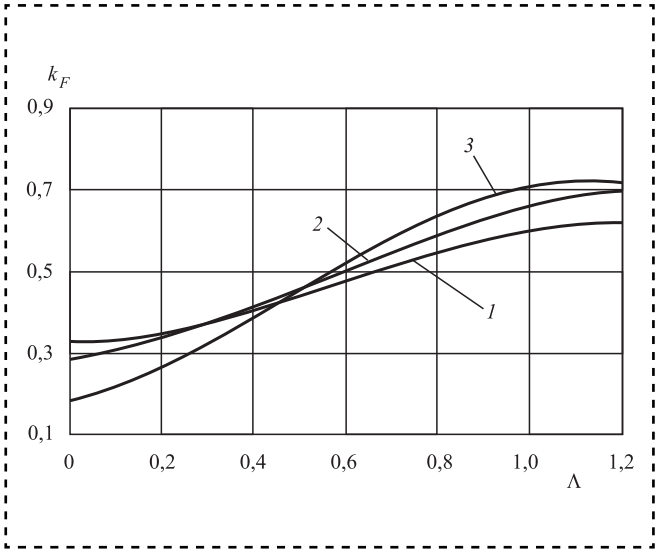

Рис. 8. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст}$ = 8; *2* — $N_{вст}$ = 6; *3* — $N_{вст}$ = 4

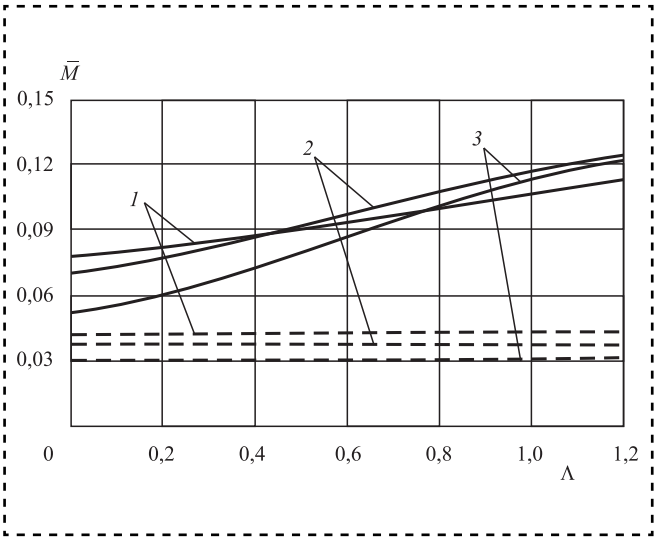

Рис. 9. Зависимость удельных моментов опор $\bar{M}$ от числа сжимаемости Λ и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст}$ = 8; *2* — $N_{вст}$ = 6; *3* — $N_{вст}$ = 4; — передняя опора; – – – задняя опора

рис. 8 и 9. При малых значениях числа сжимаемости Λ жесткость на консоли шпинделя обеспечивается большим числом пористых вставок во вкладыше опоры. Рост коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ с увеличением числа сжимаемости (частоты вращения шпинделя) связан с более выраженным эффектом смазочного клина при меньшей площади пористой поверхности вкладыша. В целом представленные графики позволяют сделать вывод о сохранении общего характера изменения характеристик в зависимости от числа вставок в одном ряду наддува. В области сравнительно высоких чисел сжимаемости большие значения удельного момента от перекоса шпинделя в переднем подшипнике, что связано с ростом нагрузки на шлифовальном круге, приходятся на небольшой диапазон изменения числа вставок.

Увеличение числа вставок в зоне малых значений числа сжимаемости благоприятно отражается на изменении угла ориентации нагрузки ψ в передней и задней опорах (рис. 10). Сказывается влияние повышения площади пористой поверхности на точность вращения шпинделя. При числах сжимаемости более 0,8 наименьший угол ψ имеет подшипник с $N_{вст}$ = 6. Это указывает на то, что между эффектами внешнего наддува газа и вращением вала существует определенное соотношение, при котором максимальный угол ориентации нагрузки не достигает больших

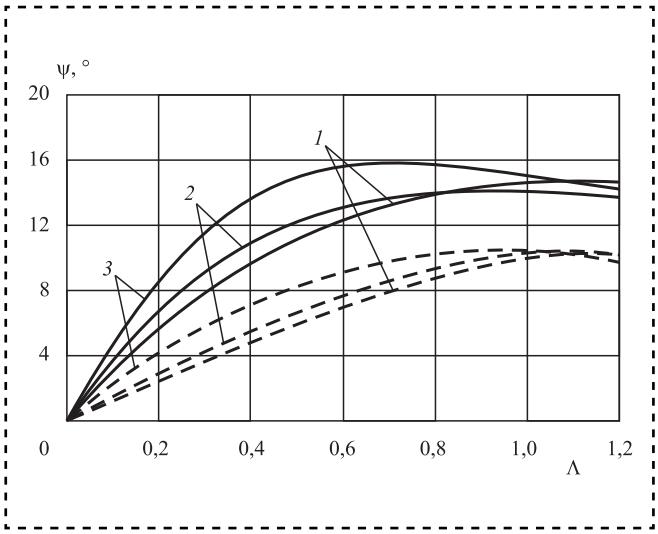

Рис. 10. Зависимость угла ориентации нагрузки ψ от числа сжимаемости Λ и числа вставок в ряду наддува:
1 — $N_{вст}$ = 8; *2* — $N_{вст}$ = 6; *3* — $N_{вст}$ = 4; — передняя опора; – – – задняя опора

значений. С повышением числа сжимаемости при $N_{вст}$ = 4—6 точность вращения шпинделя возрастает.

Выводы

При работе ШУ в режиме подвеса практически во всем диапазоне изменения конструктивного параметра наибольшая нагрузка на шлифовальном круге достигается при повышенном числе вставок в ряду наддува, что является следствием увеличения общей площади пористой матрицы вкладыша.

При работе ШУ в гибридном режиме в области сравнительно больших чисел сжимаемости наибольшую нагрузку на консоли вала определяет не максимальное число пористых вставок, а более выраженный эффект смазочного клина. При меньших и средних значениях числа вставок повышается жесткость и точность вращения шпинделя шлифовального станка.

Повышение общей площади пористой матрицы вкладыша за счет увеличения количества вставок повышает расход смазочного воздуха и технологически усложняет конструкцию газовой опоры.

Сравнение значений относительной нагрузки $\bar{F}$ для случаев удлинения вставок [3] или увеличения их числа при одинаковом конструктивном параметре K_C = 0,55 показывает, что значения относительной нагрузки примерно одинаковы ($\bar{F}$ ≈ 0,26), но конструкция вкладыша опоры в первом случае технологически проще.

Библиографический список

1. **Robinson C.H., Sterry F.** The Static Strength of Pressure Fed. // Gas Journal Bearings AERE ED/R, 1672. Harwell. Berkshire. England. 1958.

2. **Шаломов В.И.** Особенности методики расчета выходных характеристик шпиндельного узла на частично пористых газостатических опорах // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2016. № 2. С. 35—37.

3. **Шаломов В.И.** О влиянии некоторых параметров газовых опор на выходные характеристики шпиндельных узлов шлифовальных станков // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2012. № 3. С. 32—36.

ИНФОРМАЦИЯ

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2016 ГОДУ

№

Экономика и организация сборочного производства

Руднева Л.Ю. Технико-экономические основы сборки агрегатов точной механики методом групповой взаимозаменяемости 11

Технологичность конструкции

Антонец И.В. Автоматический весовой дозатор дискретного действия с измерительным устройством на основе встроенного упругого чувствительного элемента 1
Вавилов В.Е. Многокольцевые радиальные пассивные магнитные подшипники 8
Вавилов В.Е. Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии. . . . 6
Ирзаев Г.Х. Особенности обеспечения и оценки сборочной технологичности электронных СВЧ-модулей 8
Плахотникова Е.В. Техническая совместимость элементов как фактор совершенства собираемых систем "электропривод — запорная арматура". 1
Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Технологичности конструкции изделия и САПР 7

Сборочное оборудование и его элементы

Волков В.М., Должиков С.Н. Станок для притирки клапанов локомотивного тормозного компрессора 11
Денисенко А.Ф., Царфин Б.А. Оценка влияния отклонений от плоскостности планшайбы стола координатно-расточного станка на точность базирования обрабатываемых деталей . . . 11
Черняховская Л.Б. Влияние вращательного движения вала на процесс автоматической сборки цилиндрических деталей 6
Щеткин А.В. Предельные режимы движения шиберов при автоматизированной установке комплекта "уплотнение — сопрягаемая деталь" 1

Современные технологии сборки

Березин С.Я., Свиридов Ю.И. Использование концентрированных потоков акустической энергии при сборке резьбовых соединений с радиальным натягом 11

№

Есаулов В.В., Рожко Т.Е., Шашков А.Ю., Картусов С.Н. Исследование технологических свойств компаунда "Герсил-312" 2
Заярный С.Л., Ильяшенко А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния конических соединений с увеличенными натягами при их сборке-разборке гидропрессовым способом 2
Калачев О.Н., Екимов О.А. Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk. 3, 4
Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Анализ условий управляемости для систем автоматизированной сборки 3
Серга Г.В., Белокур К.А., Лебедев В.А. Технологические особенности изготовления винтовых роторов для отделочно-упрочняющей обработки деталей. 4
Сорокин М.Н. Селективная сборка: проблемы и перспективы 5
Сорокин М.Н., Кулешов В.Е., Ануров Ю.Н. Комплектование подшипников качения. 2
Степанова М.А., Медведев А.М. Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)*. 4, 5

Технологическая оснастка для сборки

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Блинов С.В. Одношпиндельный шпильковерт на основе центробежных сил инерции с контролем затяжки по моменту 10
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Необходимые и достаточные условия надежного закрепления заготовки в трехкулачковом патроне при токарной обработке на станках с ЧПУ. 12
Макаров А.М., Кухтик М.П., Мушкин О.В. Использование твердотельного компьютерного моделирования при разработке и модернизации конструкций захватных устройств для гибких контейнеров 8
Морозов А.В., Федорова Л.В., Горев Н.Н., Шамуков Н.И. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости 2
Паташов В.А., Житников Ю.З. Обоснование предельной скорости подвода к узлу завинчивающего устройства без повреждения штифтовых отверстий на узле и штифтов на исполнительном органе устройства 2

№

Сысоев С.Н., Литвинов И.С. Рычажные корректирующие устройства и метод сопряжения осесимметричных изделий 9
Шаломов В.И. Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков 12
Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Пронин А.И., Щелкунова М.Е., Марьин Б.Н. Повышение производительности обработки на сверлильно-фрезерно-расточных станках с ЧПУ за счет применения приспособления со съемной опорой 10

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Особенности индукционной пайки 12
Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка трубопроводных систем 5, 6

Транспортирование объектов сборки

Иванов Ю.В. Оптимизация транспортных операций сборки электронных модулей в роботизированном комплексе ГАСК многономенклатурного производства 3

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Антонец И.В. Разработка и исследование весоизмерительного устройства на основе упругого кольца и фотоприемной линейки . . . 9
Баранов М.А., Зеленко Г.В., Кадиев А.Р., Рощин А.В. Оценка работоспособности сенсорной локальной сети 8
Бойчук М.И., Микаева С.А. Сборка кварцевых генераторов. 10
Емельяненко А.А. Особенности виброизоляции приборов гидроакустической связи на вертикальном фундаменте 12
Есаулов В.В., Колосков А.В., Шашков А.Ю., Рожко Т.Е. Исследование процесса полимеризации компаунда "Герсил-312" в зависимости от концентрации катализатора и влажности окружающей среды 11
Кохановский В.А., Иванов С.И., Петренко А.А. Армирующий каркас антифрикционных композитов 11
Кочкин Е.В., Матвеев Е.В., Медарь А.В., Меденков В.И. Практическая реализация принципа совмещения контрольно-измерительных технологий в сборочном производстве изделий машиностроения 7

№

Кристаль М.Г., Кулагин Р.Н., Хорошевский М.Д., Иванков П.С., Ярошик Д.В. Виброконтактное устройство для контроля диаметров токопроводящих деталей 2
Можегова Ю.Н., Антонова М.Е. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий 4
Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Теоретическая оценка передаточной функции и погрешности измерения автоматического пневмоэлектронного устройства 5
Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой 3
Шуваев В.Г., Пыльнова А.В. Автоматизированная система вибрационной диагностики и ультразвуковой приработки подшипников качения 8

Разборка. Ремонт

Казанцев В.Ф., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Применение ультразвуковых колебаний различной поляризации при проведении разборочных операций 12

Соединение деталей машин

Давлетшин И.А., Медарь А.В., Барон К.А., Чернышов С.В. Конструктивно-технологическое обеспечение собираемости и взаимозаменяемости агрегатов изделий по фланцевым стыкам 12
Самохвалов В.Н. Расчет параметров процесса сборки металлокомпозитных узлов давлением импульсного магнитного поля 9
Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Сборка соединений многопроволочных проводов давлением импульсного магнитного поля 7

Экология и безопасность сборочных работ

Жуков В.В., Степанов С.А., Бычков С.П., Рябов В. Т. Разработка системы регенерации абразивного материала для установок резки маскированных кремниевых пластин . . . 11
Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением 5
Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка установки удаления запахов контейнерного типа 3

№

Трение и смазка в машинах и механизмах

Берент В.Я. Процессы, протекающие на поверхностях трения медного контакта с порошковым на железной основе 7
Болдырев С.В., Белоусов А.М., Бударова О.П. Экспериментальные исследования по определению влияния механических примесей, содержащихся в масле, на износ качающего узла аксиально-поршневого насоса . . . 11
Болдырев Д.А., Попова Л.И., Сафронов Н.Н. О некоторых проблемах материаловедения в трибологии 10
Бородай А.В. Трибология неподвижного контакта 1
Буланов Э.А. Давление сыпучего тела на стенки силоса. Плоская задача 7
Бычков Р.А., Щетинин А.М., Френкель Г.Г., Оприц З.Г., Юдин А.С., Краснов А.П. Влияние надмолекулярной структуры полимерных волокон на трибологические свойства органоволокнитов 8
Гурьянов Г.Н. Влияние коэффициентов контактного трения и вытяжки проволоки на радиальную силу в рабочем конусе волоки . . . 11
Гурьянов Г.Н. Изменение показателей напряженного состояния и запаса прочности проволоки при отклонении коэффициента трения от номинальной величины 9
Добров И.В. К вопросу теории механики процесса внешнего трения скольжения твердых тел по горизонтальной плоскости (ч. 1) 11
Долгополов К.Н., Колесников И.В. Исследования состава нефтяных остатков как перспективного сырья производства масел . . . 12
Дубовик Е.А. Использование анаэробных материалов в трибологии 3
Дубовик Е.А., Мищиненко В.Б. Определение нормативов срока службы восстановленных моторных масел в двигателях внутреннего сгорания машин 12
Дунаев В.В., Пучков В.Н. Контактные взаимодействия элементов срезного болтового соединения в условиях фреттинг-изнашивания. . . 7
Дунаев В.В., Пучков В.Н. Прочность и износ элементов болтовых соединений в условиях фреттинга 4
Измайлов В.В., Новоселова М.В. Трибологические свойства тонких пленок жирных кислот 10
Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение вынужденных колебаний в системе с нелинейным демпфированием при действии импульсной возмущающей силы 2

№

Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Гашение фрикционных автоколебаний с учетом двух направлений колебаний инструмента . . . 12
Иргашев А.И., Абдазимов А.Д., Иргашев Б.А. Факторы, влияющие на допустимую концентрацию активных абразивных частиц в масле агрегатов машин. 1
Иргашев А.И., Иргашев Б.А. Оценка износа деталей агрегатов машин по содержанию продуктов износа в масле 10
Лагунова Е.О., Гармонина А.Н., Копотун Е.А. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами 3
Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Экспериментальные исследования демпфирующих свойств магнитореологических эластомеров . . . 4
Ноженков М.В. Потоки подобных частиц без диссипации энергии 5, 6
Поляков С.А., Куксенова Л.И., Черторыльский И.С., Хазов С.П. Повышение работоспособности опор скольжения на основе формирования у них адаптационных свойств при использовании пленкообразующих смазочных материалов 2
Портнов С.В., Подкользина Л.В., Яковлев С.Н. Основные виды износа современных конструкционных полиуретанов 12
Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения 5
Шишкарев М.П., Чан Ван Дык. Особенности расчета и проектирования адаптивных фрикционных муфт 1
Шустер Л.Ш., Камалетдинова Р.Р., Чертовских С.В. Влияние нефтяной среды на триботехнические характеристики скользящего контакта в запорной арматуре. 4
Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю., Поляков А.О., Косарев И.В., Медвинская Н.С. Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок 9
Юнусходжаев С.Т. Износостойкость подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения 10

№

В помощь конструктору, технологу

Алпатов А.Н., Кадиев А.Р., Рощин А.В. Проблемы оптимизации нагрузки в распределенных вычислительных системах 3
Березин С.Я., Карпов А.Р. Энергетический принцип оценки стопорящих свойств резьбовых соединений с волнистым профилем витков одной из деталей 10
Боброва Ю.С., Андроник М., Жуков В.В., Тахаутдинов Р.Ш., Бычков С.П. Низкотемпературное термокомпрессионное сращивание меди в технологии изготовления высокоплотных микросистем 6
Гурьянов Г.Н. Прирост осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки от контактного трения при разных параметрах деформации и моделях упрочнения материала проволоки 8
Дунаев В.В., Пучков В.Н. Влияние фреттинг-износа болтового соединения с зазором на силу затяжки болта 8
Емельяненко А.А., Жабин О.И., Ярошик Д.В. Способ обеспечения прочности пластиковых корпусов-оболочек гидроакустических приборов 7
Зеленко Г.В., Кадиев А.Р., Рощин А.А., Рощин А.В. Поиск оптимального пути в графе сенсорной локальной сети для оценки ее работоспособности 7
Иванов Ю.В. Метод синтеза компьютерного проектирования техпроцессов и структур роботизированных комплексов сборки электронных изделий в многономенклатурном производстве 4

№

Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Основные задачи, решаемые программным комплексом "Контур" компьютерного проектирования роботизированных средств ГАСК сборки электронной аппаратуры в условиях многономенклатурного производства 9
Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С. Математическое моделирование периодически изменяющегося трехмерного температурного поля в многослойных цилиндрах 10
Крынина Т.А. Разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования схвата робота-манипулятора . . . 6
Микаева С.А., Микаева А.С., Ашрятов А.А., Вишневский С.А. Разработка и сборка световых приборов с изменяемым спектром излучения 1
Рапилбекова Н.С. Теплопроводность в многослойных конструкциях с изменяющейся границей 11
Самаркин А.И., Самаркина Е.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки 1
Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Моделирование сборок в CAD 4
Шаломов В.И. Особенности методики расчета выходных характеристик шпиндельного узла на частично пористых газостатических опорах 2
Шишкарев М.П. Влияние погрешностей изготовления и сборки адаптивных фрикционных муфт на их технические характеристики . . . 6

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2015 году 1

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) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.11.2016. Подписано в печать 21.12.2016. 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.