ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

2018 Том 19 / 11 (219)

СОДЕРЖАНИЕ

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Сорокин М.Н. Решение трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров (часть 3) . . . 483

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Железникова О.Е., Синицына Л.В., Микаева С.А. Сборка установки на основе интегрирующей сферы и спектрорадиометра для световых измерений 488

Трение и смазка в машинах и механизмах

Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д. Исследование структуры и антифрикционных свойств молибденсодержащего углеродного покрытия при граничной смазке 492

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Разработка главных фрикционов с металлокерамическими дисками с новыми материалами трения в трансмиссиях гусеничных машин и математической модели нагружения фрикционного материала 497

Курапов П.А. Оценка трения в контакте шероховатых тел 503

Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Оценка износостойкости режущего инструмента с покрытиями 506

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И., Дюкин А.А. Сборка индустриального комплекса очистки воздуха от примесей 510

Подготовка специалистов

Чечуга О.В. Испытания и технический контроль 517

Страницы истории

Попова Е.М., Попов В.Л. Роль аналогий и экзаптации в истории науки: от электростатики и теории гравитации к теории упругости, механике контактных взаимодействий и теории адгезии 523

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2018

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

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

2018 Vol. 19 **11 (219)**

CONTENTS

Feeding of assembly lines. Packaging arrangement. Stocking. Packing

Sorokin M.N. Solution of a three-parametrical problem of matching at any laws of distribution of the interfaced parameters (part 3) 483

Quality assurance. Testing. Monitoring

Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V., Mikaeva S.A. The assembly of the unit on the basis of the integrating sphere and spectroradiometer light measurement 488

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Buyanovskii I.A., Levchenko V.A., Bol'shakov A.N., Samusenko V.D. Research of structure and antifrictional properties of the carbon coating containing molybdenum at boundary lubrication 492

Krykhtin Yu.I., Karlov V.I. Development of the main clutches with metal-ceramic discs with advanced friction materials in the transmissions of caterpillar vehicles and development of the mathematical model of friction material loading . 497

Kurapov P.A. Friction assessment in contact of rough bodies 503

Migranov M.Sh., Migranov A.M. Evaluation of the wear resistance of the cutting tool coatings 506

Ecology and safety in assembly

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boichuk M.I., Dukin A.A. Assembly industrial complex of air purification from impurities 510

Preparation of experts

Chechuga O.V. Testing and technical inspection 517

Pages of history

Popova E.M., Popov V.L. The role of analogies and exaptation in the history of science: from electrostatics and the theory of gravitation to the theory of elasticity, the mechanics of contact interactions and the theory of adhesion 523

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

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

Editors

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

Regional editors

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

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

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2018

ПИТАНИЕ СБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ. КОМПЛЕКТАЦИЯ. СКЛАДИРОВАНИЕ. УПАКОВКА

УДК 621.717

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук*
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)
E-mail: sorokin-mn@mail.ru

Решение трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров (часть 3)

Представлен алгоритм решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров. Алгоритм основан на процедуре расширения потока и реализован на модельном примере.

The algorithm of the solution of a three-parametrical problem of matching at any laws of distribution of the interfaced parameters is presented. The algorithm is based on the procedure of expansion of a stream and realized on a model example.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, перераспределение сборочных комплектов.

Keywords: selective assembly, matching problem, redistribution of assembly sets.

Представлена реализация метода расширения потока, предложенного в работе [1], для решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров. Все определения и обозначения, используемые в данной работе, взяты из работ [2, 3]. Рассуждения и выводы, полученные в данной работе, относятся к законам распределения сопрягаемых параметров, вид которых определен в работе [2].

Решение любой трехпараметрической задачи комплектования — совокупность путей комплектования и количество сборочных комплектов на них, обеспечивающих полную собираемость изделий, а также минимальную область определения значений параметра сопряжения.

Рассмотрим реализацию метода расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров на модельном примере. Значения случайных величин ξ_i для модельного примера представлены в табл. 1 (строки 1, 2 и 3). Распределения случайных величин ξ_i приведены на рис. 1.

Таблица 1

Распределение случайных величин

Номер строки	Случайная величина	Значения случайных величин								
		−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4
1	ξ_1	4	8	10	14	20	30	20	14	10
2	ξ_2	14	18	34	22	14	10	8	6	4
3	ξ_3	2	6	8	12	24	34	22	16	6
4	ξ'_3	–	–	–	–	8	32	72	12	–
5	ξ'_3	–	–	8	32	72	12	–	–	–
6	ξ'_3	–	–	16	22	82	8	2	–	–
7	ξ'_{31}	–	–	–	–	82	–	–	–	–
8	ξ'_{32}	–	–	16	22	–	8	2	–	–
9	η'	–	–	28	82	20	–	–	–	–
10	η	–	–	–	–	28	82	20	–	–

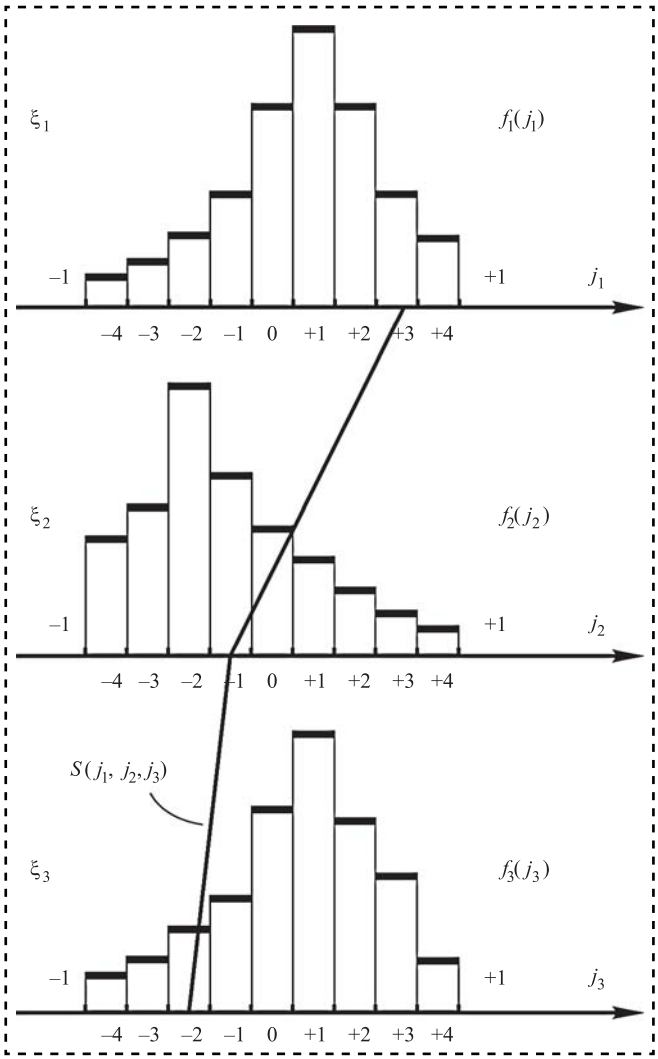

Рис. 1. Распределение случайных величин ξ_i

Уравнение сопряжения для модельного примера примем в числовых индексах:

$$j = j_1 - j_2 - j_3.$$

Вид уравнения сопряжения не имеет принципиального значения для рассматриваемого метода.

Решение данной трехпараметрической задачи комплектования разобьем на семь этапов.

Первый этап

Решаем двухпараметрическую задачу комплектования со случайными величинами ξ_1 и ξ_2 для уравнения сопряжения: $j_3' = j_1 - j_2$ методом полного целенаправленного суммирования [5] (табл. 2). Результатом решения любой двухпараметрической задачи комплектования являются пути комплектования и количество сборочных комплектов на них, а также распределение параметра сопряжения как случайной величины. Для модельного примера распределение параметра сопряжения j_1' как случайной величины ξ_3' представлено в табл. 1 (строка 4) и на рис. 2.

Таблица 2

Решение двухпараметрической задачи комплектования для случайных величин ξ_1 и ξ_2

Номер строки	j_1	j_2	$j_1 - j_2$	p	j_3'					
					−2	−1	0	+1	+2	+3
1	+4	+4	0	4	–	–	4	–	–	–
2	+4	+3	+1	6	–	–	–	6	–	–
3	+3	+2	+1	8	–	–	–	8	–	–
4	+3	+1	+2	6	–	–	–	–	6	–
5	+2	+1	+1	4	–	–	–	4	–	–
6	+2	0	+2	14	–	–	–	–	14	–
7	+2	−1	+3	2	–	–	–	–	–	2
8	+1	−1	+2	20	–	–	–	–	20	–
9	+1	−2	+3	10	–	–	–	–	–	10
10	0	−2	+2	20	–	–	–	–	20	–
11	−1	−2	+1	4	–	–	–	4	–	–
12	−1	−3	+2	10	–	–	–	–	10	–
13	-2	−3	+1	8	–	–	–	8	–	–
14	−2	−4	+2	2	–	–	–	–	2	–
15	−3	−4	+1	8	–	–	–	8	–	–
16	−4	−4	0	4	–	–	4	–	–	–
17	Итого						8	38	72	12

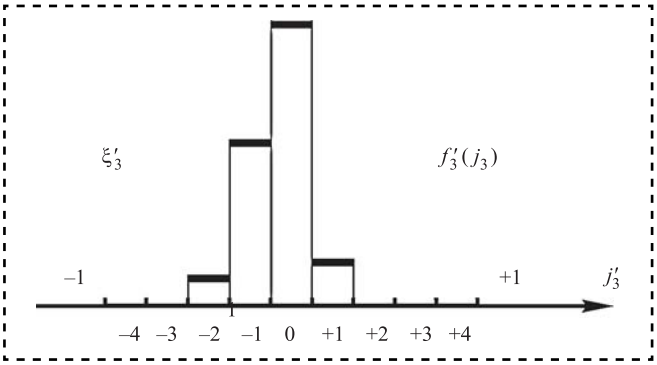

Рис. 2. Распределение случайных величин j_i'

Второй этап

Осуществляем замену переменной j_1 на переменную j_1' следующим образом:

$$j_1' = j_1 - 2.$$

Таблица 3

Решение двухпараметрической задачи комплектования при замене числового индекса j_1 на числовой индекс j_1'

Номер строки	j_1	j_2	$j_1 - j_2$	p	j_3'					
					−2	−3	−2	−1	0	+1
1	+2	+4	0	4	—	—	4	—	—	—
2	+2	+3	+1	6	—	—	—	6	—	—
3	+1	+2	+1	8	—	—	—	8	—	—
4	+1	+1	+2	6	—	—	—	—	6	—
5	0	+1	+1	4	—	—	—	4	—	—
6	0	0	+2	14	—	—	—	—	14	—
7	0	−1	+3	2	—	—	—	—	—	2
8	−1	−1	+2	20	—	—	—	—	20	—
9	−1	−2	+3	10	—	—	—	—	—	10
10	−2	−2	+2	20	—	—	—	—	20	—
11	−3	−2	+1	4	—	—	—	4	—	—
12	−3	−3	+2	10	—	—	—	—	10	—
13	−4	−3	+1	8	—	—	—	8	—	—
14	−4	−4	+2	2	—	—	—	—	2	—
15	−5	−4	+1	8	—	—	—	8	—	—
16	−6	−4	0	4	—	—	4	—	—	—
17	Итого						8	38	72	12

При этом распределение случайной величины ξ_3' сместится по числовой оси j_1 на величину −2. Сдвиг, равный двум единицам, выбран исходя из того, чтобы в распределении случайной величины ξ_3' наибольшее количество сборочных комплектов приходилось для числового индекса j_1', равного нулю ($j_1' = 0$).

В табл. 1 (строка 5) и табл. 3 представлены пути комплектования и количество сборочных комплектов на них, распределение случайной величины ξ_3' при замене числового индекса j_1 на числовой индекс j_1'. В дальнейшем один и тот же символ может обозначать разные параметры. Новые символы не будем вводить, чтобы не усложнять систему обозначений в работе. Смысл обозначения параметра вытекает из контекста фрагмента работы.

Третий этап

Рассмотрим структуру решения двухпараметрической задачи комплектования, полученную методом полного целенаправленного суммирования на втором этапе с учетом замены переменной. Множество путей комплектования S, определяющих решение двухпараметрической задачи комплектования, состоит из подмножеств S_0, S_1 и S_2.

Подмножество S_0 состоит из путей комплектования, для которых выполняется условие: $j_1 - j_2 = 0$. Подмножество S_1 состоит из путей комплектования, для которых выполняется условие: $j_1 - j_2 = \pm 1$. Подмножество S_2 состоит из путей комплектования, для которых выполняется условие: $j_1 - j_2 = \pm 2$.

Из подмножества S_1 методом расширения потока [4] выделим пути комплектования, для которых будет выполняться условие: $j_1 - j_2 = 0$. При этой операции другие пути комплектования перейдут в подмножество S_2. Количество путей комплектования подмножества S_0 увеличится, а количество путей комплектования, принадлежащих подмножествам S_1 и S_2, уменьшится.

На рис. 3 представлены пути комплектования, определяющие подмножество S_0.

На рис. 4 и в табл. 1 (строка 6) представлено окончательно сформированное распределение случайной величины ξ_3'.

Будем считать, что пути комплектования подмножества S_0 определяют переменную часть ξ_{31}' распределения случайной величины ξ_3', а пути комплектования подмножеств S_1 и S_2 определяют постоянную часть ξ_{32}' распределения случайной величины ξ_3'. Множество путей комплектования S_0 определяет 82 сборочных комплекта, состоящих из деталей первого и второго видов. Пути комплектования,

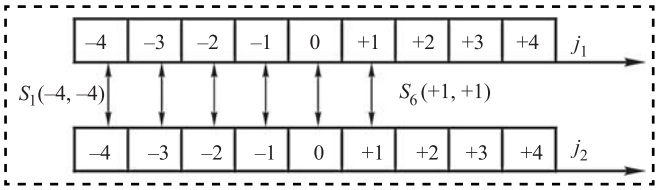

Рис. 3. Пути комплектования подмножества S_0

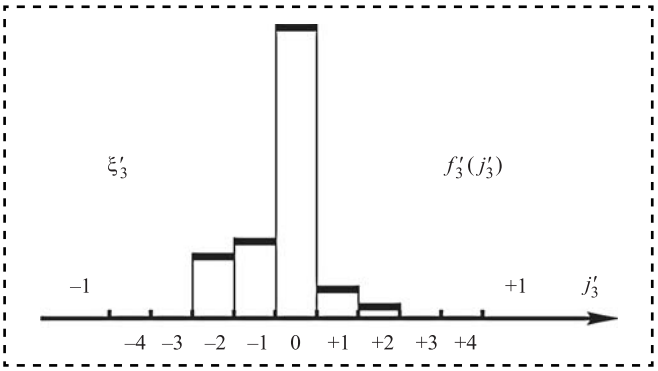

Рис. 4. Распределение ξ_3' как объединение ξ_{31}' и ξ_{32}'

принадлежащие подмножествам S_1 и S_2, определяют 48 сборочных комплектов, состоящих из деталей первого и второго видов. Распределение величин ξ'_{31} и ξ'_{32} дано в табл. 1 (строки 7 и 8).

Четвертый этап

В соответствии с результатами работ [1] и [4] переменную часть ξ'_{31} распределения случайной величины ξ'_3, построенную на путях комплектования подмножества S_0, перераспределим в последовательность симметричных распределений ξ'_{31} на отрезке $[-1, +1]$.

Таблица 4

Последовательность распределений параметра сопряжения j'_3

Номер строки	j'_{31}								
	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4
1	1	3	9	16	24	16	9	3	3
2	2	3	9	15	24	15	9	3	3
3	2	3	9	15	24	15	9	3	3
4	3	4	9	14	22	14	9	4	4
5	4	5	9	12	22	12	9	5	5
6	4	6	9	12	20	12	9	6	6
7	5	6	9	12	18	12	9	6	6
8	6	6	9	11	18	11	9	6	6
9	7	7	9	11	15	11	9	7	7
10	7	8	9	10	14	10	9	8	8
11	8	8	9	10	12	10	9	8	8
12	9	9	9	9	10	9	9	9	9

Таблица 5

Определение значений параметра сопряжения j

Номер строки	j'_3									j					
	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4	−3	−2	−1	0	+1	+2
1	1	3	25	16	24	16	11	3	1	–	30	83	12	5	–
2	2	3	25	15	24	15	11	3	2	–	29	83	15	3	–
3	2	3	25	15	24	15	11	4	2	–	25	87	15	3	–
4	3	4	25	14	22	14	11	4	3	–	28	83	18	1	–
5	4	5	25	12	22	12	11	5	4	–	28	82	20	–	–
6	4	6	25	12	20	12	11	6	4	–	28	82	20	–	–
7	5	6	25	12	18	12	11	6	5	–	28	82	20	–	–
8	6	6	25	11	18	11	11	6	6	–	29	80	21	–	–
9	7	7	25	11	15	11	11	7	6	–	12	78	40	–	–
10	7	8	25	10	14	10	11	8	7	–	32	75	22	1	–
11	8	8	25	10	12	10	11	8	8	–	34	70	22	2	–
12	9	9	25	9	10	10	11	9	9	–	40	61	26	3	–

Эти симметричные распределения ξ'_{31} должны изменяться в пределах (приблизительно) от равномерного до нормального распределений. Эта последовательность из 12 симметричных распределений представлена в табл. 4.

Пятый этап

Каждое из 12 симметричных распределений ξ'_{31} в табл. 4 объединим с постоянной частью ξ'_{32} распределения случайной величины ξ'_3. В табл. 5 (столбец 2) даны распределения случайной величины ξ'_3 как объединение симметричной ξ'_{31} и постоянной ξ'_{32} частей распределения ξ'_3.

Шестой этап

Для каждого объединенного распределения случайной величины ξ'_3 решаем двухпараметрическую задачу комплектования, т.е. задачу комплектования со случайными величинами ξ'_3 и ξ_3 для уравнения сопряжения

$$j' = j'_3 - j_3.$$

В табл. 5 (столбец 3) представлена область значений параметра сопряжения j' или область значений случайной величины η, т.е. часть решения данной трехпараметрической задачи комплектования при условии $j'_1 = j_1 - 2$. Минимальное значение поля допуска параметра сопряжения j' достигается тогда, когда переменная часть ξ'_{31} распределения случайной величины ξ'_3 имеет значения, указанные в табл. 4 (строки 5, 6 и 7). Минимальное значение поля допуска параметра сопряжения j' приведено и в табл. 1 (строка 9).

При реализации шестого этапа использовали следующее свойство двухпараметрической задачи комплектования. Если случайные величины ξ_1 и ξ_2 определяют задачу комплектования и случайная величина ξ_1 является случайной величиной произвольного вида, а случайная величина ξ_2 изменяется от равномерной до нормальной, то поле допуска случайной величины η как целенаправленной суммы случайных величин ξ_1 и ξ_2 изменяется незначительно.

Седьмой этап

Осуществляем обратную замену переменной j'_1:

$$j_1 = j'_1 + 2.$$

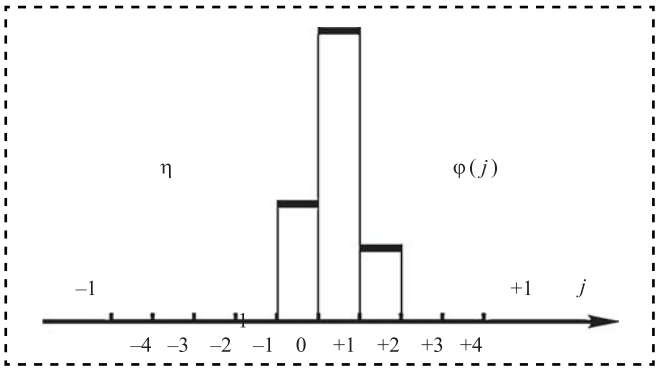

Рис. 5. Распределение параметра сопряжения *j*

Получим область значений параметра сопряжения *j* (табл. 1 (строка 10), рис. 5).

Точность решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров определяет реализация третьего и четвертого этапов.

Таким образом, предложенный метод определяет область значений параметра сопряжения *j*. Считаем, что предложенный метод определяет минимальную область значений параметра сопряжения *j*. В данной работе пути комплектования и количество сборочных комплектов на них, определяющих решение данной задачи, не приводятся. Построение путей комплектования и количества сборочных комплектов на них для трехпараметрической задачи комплектования изложено в работах [1, 2].

Нельзя утверждать, что предложенный метод решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров определяет точное решение задачи. Данный метод дает точное решение в случае, если случайные величины $\xi_i, i = \overline{1,3}$, определяющие сопрягаемые параметры x_i деталей, имеют симметричное распределение. Если случайные величины $\xi_i, i = \overline{1,3}$, определяющие сопрягаемые параметры x_i деталей, имеют произвольное распределение, то можно говорить лишь о том, обеспечивает ли предложенный метод минимально возможное значение поля допуска параметра сопряжения или нет. Компьютерное моделирование модельных примеров подтверждает высокую точность решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров предложенным методом.

Реализацию метода расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования в программной среде должен осуществлять специалист, понимающий физическую сущность трехпараметрической задачи комплектования.

Предложенный метод может быть применен для решения трехпараметрической задачи комплектования и в случае, если поля допусков сопрягаемых параметров x_i представлены в виде неравных отрезков т.е.:

$$\delta x_1 = [-1, +1];$$
$$\delta x_1 = [-1 - a, +1 + a];$$
$$\delta x_1 = [-1 - b, +1 + b], \ a > 0, \ b > 0, \ b > a.$$

Выводы

1. Предложен метод решения трехпараметрической задачи комплектования при произвольных законах распределения сопрягаемых параметров.

2. Метод решения трехпараметрической задачи комплектования обеспечивает точность решения, приемлемую в инженерной практике.

2. При применении метода межгрупповой взаимозаменяемости для решения трехпараметрической задачи комплектования точность полученного решения в 6—8 раз выше, чем при применении метода полной взаимозаменяемости.

Библиографический список

1. **Сорокин М.Н.** Метод расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 12. С. 531—535.

2. **Сорокин М.Н.** Решение трехпараметрической задачи комплектования частного вида (часть 1) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 5. С. 212—220.

3. **Сорокин М.Н.** Решение трехпараметрической задачи комплектования при симметричных законах распределения сопрягаемых параметров (часть 2) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 9. С. 402—408.

4. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А.** Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 7—13.

5. **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. 2012. № 9. С. 15—18.

УДК 535.24

О.Е. Железникова, Л.В. Синицына, *канд-ты техн. наук*
(Институт электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),
С.А. Микаева, *д-р техн. наук (Московский технологический университет)*
E-mail: mikaeva@npo.lit

Сборка установки на основе интегрирующей сферы и спектрорадиометра для световых измерений

Представлена новая уникальная установка на основе интегрирующей сферы OL IS-7600 и спектрорадиометра OL 770, которая позволяет с высокой точностью измерять не только световой поток источников света и световых приборов, но и целый комплекс световых, радиометрических и колориметрических характеристик. Использование данной установки дает возможность существенно усовершенствовать традиционные методики в направлении точности, скорости выполнения и наглядности представления результатов измерений.

New unique installation based on the integrating sphere OL IS-7600 and spectroradiometer OL 770 wich allows to measure not only the luminous flux of light sources and lighting devices, but also a whole range of lighting, radiometric and colorimetric characteristics is presented. The use of this machine gives an opportunity to significantly improve the traditional methods in the direction of accuracy, speed and clarity of presentation of measurement results.

Ключевые слова: интегрирующая сфера, спектрорадиометр, световой поток, точность световых измерений, спектральное распределение излучения, диаграмма цветности, коррелированная цветовая температура, общий индекс цветопередачи, эталонная лампа, вспомогательная лампа.

Keywords: integrating sphere, spectroradiometer, light flux, accuracy of the light measurements, spectral distribution of the radiation chromaticity diagram, correlated color temperature general color rendering index, standard lamp, auxiliary lamp.

Центр коллективного пользования (ЦКП) "Светотехническая метрология" МГУ им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, Россия) располагает в настоящее время уникальным оборудованием для измерения светового потока на основе интегрирующей сферы (фотометрического шара) и многоканального спектрорадиометра OL Series770 компании Gooch & Housego (США) [1].

Световой поток (СП) источников света (ИС) можно определить либо по известному распределению силы света методом расчета, либо методом измерения с помощью фотометрического шара — шара Ульбрихта (Ulbricht). Первый метод основан на измерении силы света ИС I_i в большом числе n заранее выбранных направлений, расчете световых потоков $\Delta\Phi_i$ внутри достаточно малых телесных углов $\Delta\Omega_i$ и суммировании этих световых потоков ($\Sigma\Delta\Omega_i = 4\pi$). Данный способ достаточно трудоемкий. Кроме того, работа должна проводиться в темной комнате. Поэтому в большинстве случаев более удобным оказывается измерение СП методом сопоставления освещенностей исследуемого ИС и ИС с известным световым потоком [2].

Теория интегрирующей сферы. Согласно теории фотометрического шара, СП, рассеиваемый его внутренней поверхностью, распределяется по ней идеально равномерно. Если коэффициент отражения ρ одинаков по всей поверхности, то источник со световым потоком Φ, помещенный в центр сферы, создает во

всех ее точках одинаковую освещенность $E_{сум}$ за счет многократных отражений:

$$E_{сум} = E_{пр} + \frac{\rho}{1-\rho}\frac{\Phi}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где $E_{пр}$ — освещенность, которую ИС создает в данной точке при непосредственном падении света на внутреннюю поверхность сферы;

r — радиус сферы.

Из выражения (1) следует, что освещенность, создаваемая многократными отражениями, одинакова в любой точке и прямо пропорциональна полному световому потоку ИС.

Если с помощью малого непрозрачного экрана, помещенного внутрь сферы, защитить какую-нибудь точку сферы от прямого света ИС, то освещенность такой точки будет прямо пропорциональна потоку ИС:

$$E = \frac{\rho}{1-\rho}\frac{\Phi}{4\pi r^2} = a\Phi, \quad (2)$$

где a — коэффициент пропорциональности, зависящий только от свойств сферы.

Поэтому, если испытуемый ИС с неизвестным световым потоком Ф заменить внутри сферы на образцовый источник с известным световым потоком Φ_0, то освещенность в точке будет равна

$$E_0 = a\Phi_0. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) получаем

$$\Phi = \frac{E}{E_0}\Phi_0. \quad (4)$$

Как следует из теории шара, светорассеивающие свойства поверхности интегрирующей сферы имеют первостепенное значение. Прежде всего, коэффициент отражения поверхности во всех точках должен быть один и тот же. Кроме того, поверхность должна рассеивать падающее излучение в соответствии с законом Ламберта. От соблюдения этих условий будет зависеть точность проводимых измерений СП.

Технические характеристики и конструкция интегрирующей сферы OL IS-7600 со спектрорадиометром OL 770 (рисунок). Диаметр

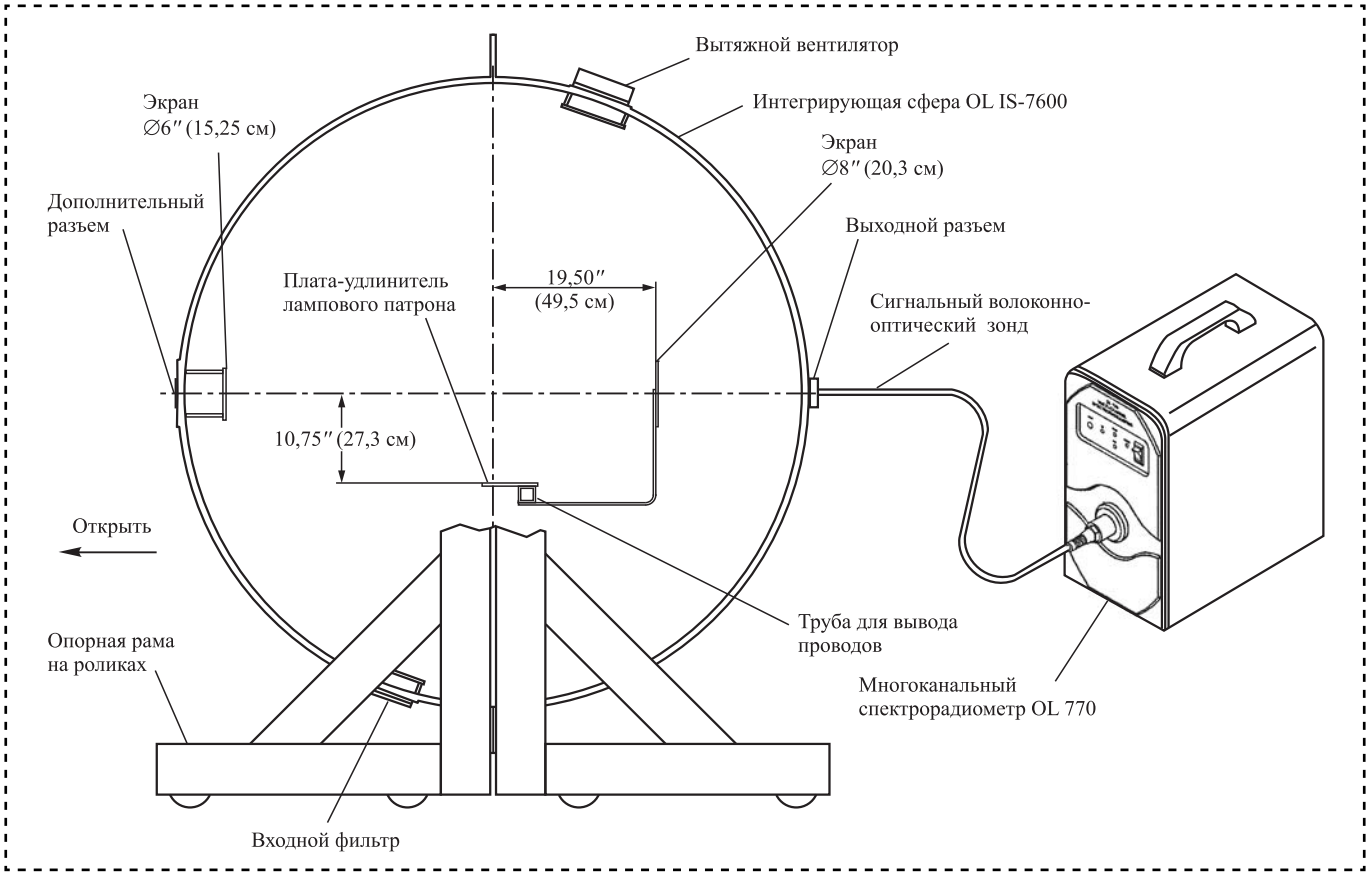

Схема установки для световых измерений

сферы 190,5 см (75″). Интегрирующая сфера конструктивно состоит из двух отдельных полушарий, двух портов выхода, дополнительного порта ИС и внутреннего крепления патрона ИС. Оба полушария легко раздвигаются для облегчения установки, замены ИС или частей крепежа. Сфера может вместить в себя ИС длиной 152,4 см (60″) при максимальном значении СП 200 000 лм [3].

Выходное отверстие сферы OL IS-7600 имеет внутренний экран диаметром 20,3 см, который затеняет фотометрическое отверстие со светорассеивающим стеклом от попадания прямых лучей. Его расположение просчитано таким образом, чтобы способствовать повышению точности световых измерений. Второй экран диаметром 15,25 см препятствует попаданию излучения от вспомогательного источника на измеряемую или калибровочную лампу и фотометрическое отверстие. Вертикальная сквозная труба предназначена для подключения ИС к источнику питания. Сфера установлена на прочную опорную раму с роликами.

Внутренняя поверхность и экраны каждого полушария покрыты высококачественным светоотражающим материалом на основе сульфата бария (Оптолон 2 ТМ). Использование опалового рассеивателя, входящего в комплект, определяет эффективный диапазон длин волн измеряемого излучения от 350...1100 нм. В комплекте с интегрирующей сферой идут калибровочный и вспомогательный ИС. Последний предназначен для учета и определения влияния на результат измерений различных приспособлений, находящихся в сфере.

Технические характеристики интегрирующей сферы

Материал сферы и рам крепления полушарий	Алюминий
Внутренний диаметр сферы, см (дюйм)	190,5 (75)
Материал покрытия сферы	Оптолон 2 ТМ
Коэффициент отражения в видимой области, %	98,6
Диапазон длин волн, нм	350...1100
Тип вспомогательной лампы	DZE
Мощность вспомогательной лампы, Вт	150
Максимальная длина измеряемого ИС, см (дюйм)	152,4 (60)
Габаритные размеры, см	200×216×234
Примерная масса, кг	640

Внутри сферы находится плата-удлинитель для крепежей ИС. Важное преимущество сферы OL IS-7600 — универсальная крепежная система OL ISA-UB, которая позволяет устанавливать различные виды крепежей.

Если световой поток ИС превышает динамический диапазон системы измерения, то для его уменьшения используют одну из трех входящих в комплект поставки аппертурных диафрагм диаметрами 0,5; 1,5 и 3 мм. Причем сначала устанавливают первую, самую большую диафрагму (3 мм) и проверяют работу, а затем, если уровень сигнала будет все еще слишком высоким, устанавливают диафрагму меньшего размера и т.д., пока не будет получен нужный уровень сигнала.

Рассматриваемая установка уникальна тем, что позволяет измерять не только световой поток ИС и СП, но и целый комплекс световых, радиометрических и колориметрических характеристик. В качестве системы "приемник излучения—регистрирующий прибор" используют многоканальный спектрорадиометр OL 770. Он включает в себя спектрограф, термоэлектрически охлаждаемый сенсор ПЗС-матрицы, внутреннюю эталонную лампу, источник питания и электронные схемы управления в удобном, портативном корпусе. Излучение от интегрирующей сферы поступает в спектрорадиометр OL 770 через оптоволоконный зонд длиной 1 м, диаметром 3 мм и вход во внутренний спектрограф [4—6].

Основные характеристики спектрографа OL 770-VIS/NIR

Диапазон длины волны, нм	380...1100
Точность длины волны, нм	±1,0
Оптическая полоса пропускной способности (с минимальным отверстием 100 мкм), мм	5,0
Спектральное разрешение, мм	0,75
Диафрагма, мкм	100
Оптическое фокусное расстояние, мм	140
Оптическая диафрагма	*f*/2

Одно из достоинств спектрорадиометра OL 770 — наличие внутренней эталонной лампы (OL 700-20-X), которая позволяет пользователю быстро провести калибровку системы и поддерживать ее точность.

Для применяемой в конфигурации со спектрорадиометром OL 770 интегрирующей сферы используют стандарт калибровки Национального института стандартов и технологий

США. Внутренняя вспомогательная лампа также проходит точную систему калибровки. Благодаря этому описываемый многоканальный спектрорадиометр может выполнять точные измерения спектральных (спектральная плотность потока излучения, спектральная плотность светового потока, пиковая, доминирующая, центроидная длины волн), фотометрических (световой поток, яркость), радиометрических (энергетическая яркость, облученность) и колориметрических (координаты цветности в системах *XYZ* и *U'V'W'*, чистота цвета, коррелированная цветовая температура, специальные и общий индексы цветопередачи) характеристик исследуемых ИС и СП [4, 5].

Прикладное программное обеспечение, разработанное для использования с системой OL 770, позволяет осуществлять:

- вывод на дисплей данных, их регистрацию и хранение;
- вывод данных в Word и Excel;
- представление графики в реальном режиме времени;
- переход курсора к пику/минимуму;
- аккумуляцию графиков для изучения;
- представление диаграмм цветности в системах *XYZ* (1931 г.), *U'V'W'* (1960, 1976 гг.).

Рассмотренная установка на основе интегрирующей сферы OL IS-7600 и спектрорадиометра OL 770 для проведения фотометрических и колориметрических измерений отвечает самым высоким требованиям, предъявляемым к их точности. В процессе эксплуатации измерительный комплекс необходимо правильно обслуживать и регулярно калибровать. Как показала практика проведения фотометрических измерений для различных ИС, в том числе и светоизлучающих диодов, использование данной установки позволило существенно усовершенствовать традиционные методики в направлении точности, скорости выполнения и наглядности представления результатов измерений. Погрешность фотометрических данных составляет ±5 %, воспроизводимость фотометрических данных — ±2 %, погрешность определения координат цветности — ±0, 002, воспроизводимость координат цветности — ±0, 0005, воспроизводимость измерения коррелированной цветовой температуры — координат цветности ±20 K (при 2856 K).

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 150 с.
2. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: МИРЭА, 2017. 136 с.
3. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.
4. **Ашрятов А.А., Вишневский С.А.** Методика расчета колориметрических характеристик световых приборов с изменяемым спектром излучения // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 3. С. 108—111.
5. **Железникова О.Е., Прытков С.В., Вилков Е.А.** К вопросу выбора оптимального метода расчета коррелированной цветовой температуры // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 1. С. 32—36.
6. **Филинов В.В., Филинова А.В., Родюков М.С.** Разработка средств неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных сталей на основе использования магнитных шумов // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3. С. 114—123.

УДК 621.891:539.2

И.А. Буяновский, *д-р техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН),*
В.А. Левченко, *канд. физ.-мат. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова),*
А.Н. Большаков *(ООО "Мониторинг Вентиль и Фитинг", Москва),*
В.Д. Самусенко, *канд. техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)*
E-mail: buyan37@mail.ru

Исследование структуры и антифрикционных свойств молибденсодержащего углеродного покрытия при граничной смазке

Исследована структура и антифрикционные свойства монокристаллического углеродного покрытия, легированного молибденом, в модельных смазочных средах при трении в режиме граничной смазки. Установлена возможность повышения антифрикционных свойств модельных смазочных сред путем нанесения на рабочие поверхности трущихся элементов углеродных покрытий, легированных молибденом.

The structure and antifrictional properties of the carbon coating containing molybdenum in model lubricant environments at friction in the mode of boundary lubricantion is investigated. The possibility of increase antifrictional properties of model lubricant environments by deposition on working surfaces of the rubbing elements of the carbon coating containing molybdenum is established.

Ключевые слова: твердое углеродное покрытие, антифрикционные свойства, нанотвердость, легирование молибденом, граничный слой, модельные смазочные среды, монокристаллический углерод.

Keywords: hard carbon coating, antifrictional properties, nanohardness, alloying with molybdenum, boundary layer, model lubricant environments, monocrystalline carbon.

Введение

Один из перспективных путей влияния на смазочные свойства масел — нанесение на рабочие поверхности деталей алмазоподобных углеродных покрытий [1, 2]. Особый интерес исследователей вызывают металлсодержащие углеродные покрытия, поскольку легирование этих покрытий кобальтом, цезием, марганцем, титаном и другими металлами оказывает заметное влияние на трибологические свойства смазочных сред [3]. Исследования смазочной способности масел при трении стальных деталей с покрытиями аморфного углерода показали, что легирование этих покрытий вольфрамом повышает антифрикционные свойства масел с серосодержащими присадками [4]. В результате трибохимического взаимодействия серы, содержащейся в смазочной среде, и вольфрама, легирующего углеродное покрытие, на поверхности раздела трущихся тел образуется дисульфид вольфрама, имеющий высокую смазочную способность. Аналогичный эффект имеет место при трении в серосодержащей среде монокристаллического углеродного (МКУ) покрытия легированного не только вольфрамом, но и другими элементами VI B группы Периодической системы, в частности, молибденом.

Цель работы — исследование структуры монокристаллического углеродного покрытия, легированного молибденом (МКУ + Mo), и его антифрикционных свойств в инактивной смазочной среде и в средах с двумя разведенными характерными антифрикционными присадками — поверхностно-активной (олеиновой кислотой (ОК)) и высокотемпературной химически активной (дитиокарбаматом молибдена (ДТКМо)).

Таблица 1

Физико-механические свойства покрытий*

Характеристики	Без покрытия	МКУ	МКУ + Mo
Нанотвердость, ГПа	9,210	11,450	12,180
Модуль упругости, ГПа	167	156	172,4
Глубина вдавливания h_m, нм	208	210	191
Остаточная глубина вдавливания h_p, нм	162	146	132
Упругое восстановление $R_e = (h_т - h_p)/h_p$	0,221	0,309	0,308

* Средние значения по результатам десяти измерений.

МКУ покрытия наносили на цилиндрические поверхности роликов из стали 100Cr6 методом импульсной конденсации углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами аргона [6, 7]. Легирование углеродного покрытия осуществляли бомбардировкой ионами молибдена. Скорость плазмы в потоке — $7 \cdot 10^4$ м/с. Продолжительность импульса — 100 мкс. На протяжении импульса плотность энергии варьировалась от 13 до 30 Дж/см^2. Метод плазменной ионной имплантации и осаждения обеспечивает эффективную адгезию между сталью и наносимым покрытием.

Физико-механические свойства исследуемых материалов оценивали с помощью измерительного комплекса CSM Micro Indentation Tester MHTX при скоростях нагружения алмазной пирамиды 20,0 мН/мин, времени выдержки под нагрузкой 10 с, максимальной нагрузке 10 мН. Измерения проводили с использованием трехгранной пирамиды Берковича (табл. 1).

Нанесение покрытия монокристаллического углерода на стальные образцы обеспечивает повышение нанотвердости поверхности с 9,2 до 11,5 ГПа, а легирование покрытия молибденом — до 12,2 ГПа.

Исследование элементного состава и структуры покрытия. С помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра PHI VersaProbe II 5500 исследовали содержание молибдена в углеродном покрытии и его изменение по глубине. Для определения толщины слоя проводили глубинное профилирование приповерхностного слоя образцов, заключавшееся в регистрации РФЭ-спектров при последовательном удалении тонких слоев образца покрытия (рис. 1). Элементный состав покрытия определяли путем анализа полученных РФЭ-спектров с помощью специализированного ПО MultiPak 9.0 (табл. 2 и 3).

Наличие/отсутствие МКУ в составе покрытия определяли по картинам электронной дифракции в обратном пространстве, полученным на просвечивающем аналитическом электронном микроскопе FEI Tecnai G2 F20 с ЭДС приставкой EDAX на микрообразцах поперечного сечения для определения параметров атомно-кристаллической структуры на границах зерен, а также методом просвечивающей электронной микроскопии в режиме сканирования с электронно-зондовым микрорентгеноспектральным анализом элементного состава (рис. 2).

Анализируемый материал образует четкие единичные рефлексы, характеризующие монокристаллическую структуру. Для МКУ + Mo (рис. 2, *б*) наблюдается группа отдельных рефлексов, образующих тонкие концентрические кольца, что характеризует поликристаллическую структуру покрытия, образованную нанокристаллами. Таким образом, легирование молибденом изменяет структуру покрытия с монокристаллического углерода, находяще-

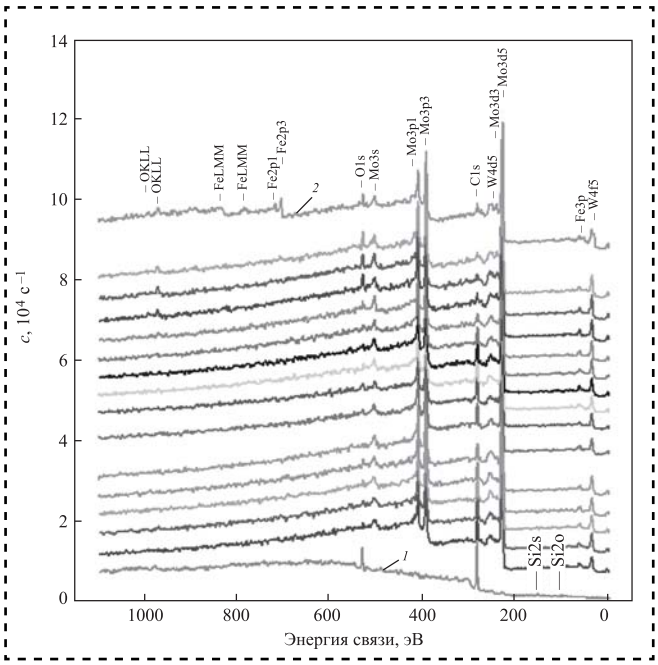

Рис. 1. РФЭ-спектры от образца монокристаллического углеродного покрытия, легированного молибденом:
1 — нижний спектр — поверхность покрытия; *2* — верхний спектр — после профилирования на глубину 550 нм; *c* — число отсчетов в секунду

Таблица 2

Изменение концентраций элементов, %, по глубине образца с покрытием МКУ + Mo при РФЭС профилировании

Глубина, нм	РФЭС линия элемента					
	C1s	O1s	Si2p	Fe2p3	Mo3d	W4d
0	79,8	15,8	3,8	0	0,6	0
35	66,6	7,6	1,4	0	24,4	0,1
70	58,6	4,1	0,3	0,5	36,2	0,4
105	55,9	5,6	0,3	1,1	36,6	0,4
140	52,7	6,5	0,3	0,9	39,0	0,5
175	53,1	5,6	0,1	0,3	40,4	0,6
210	59,2	4,7	0	0,3	35,4	0,4
245	62,4	5,1	0	0,6	31,6	0,3
280	60,6	5,9	0	0,3	33,0	0,2
315	55,5	6,8	0	0,1	37,5	0,1
350	46,9	8,7	0	0,1	43,5	0,7
385	37,3	12,6	0	0,7	47,9	1,4
420	26,4	18,2	0,4	1,5	51,8	1,7
455	19,9	20,9	0,8	1,4	55,3	1,6
490	23,2	19,1	0,4	2,4	52,7	2,2
525	29,1	17,0	0	6,7	44,0	3,2

Таблица 3

Типы и относительное количество, %, связей углерода по глубине образца

Глубина, нм	Тип связи элемента			
	Mo—C	Csp2	Csp3	C0
	Энергия связи, эВ			
	282,9	284,6	285,8	288,7
0	1,4	73,3	22,6	2,7
35	51,3	48,7	0	0
70	35,4	29,3	27,2	8,1
105	44,3	32,9	21,6	1,2
140	56,7	30,4	12,9	0
175	58,5	28,4	13,1	0
210	46,8	49,7	3,5	0
245	31,9	40,7	27,4	0
280	47,9	44,3	7,8	0
315	39,3	27,9	26,4	6,4
350	45,1	24,1	16,2	14,6
385	62,9	32,1	4,9	0
420	42,9	19,6	14,7	22,8
455	62,6	37,4	0	0
490	62,2	37,8	0	0
525	48,0	19,0	19,2	13,8

гося в аморфной матрице, на поликристаллический углерод (табл. 4).

Трибологические исследования. Трибологические характеристики исследуемых материалов оценивали на лабораторной установке КТ-2 [8] по схеме трения "вращающийся шар — три ролика" с измененной конструкцией оправки (рис. 3). В качестве исследуемых образцов использовали стандартные детали подшипников качения, имеющие постоянные, тщательно контролируемые физико-механические характеристики и постоянную микрогеометрию

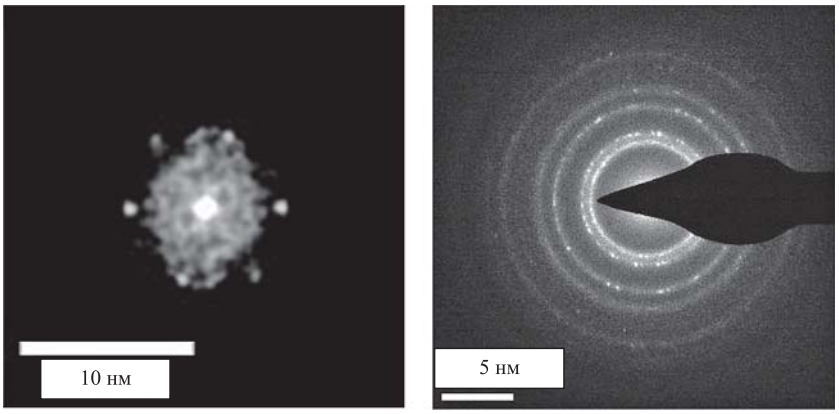

Рис. 2. Картины электронной дифракции от элементов микроструктуры покрытий МКУ (*а*) и МКУ + Mo (*б*)

Таблица 4

Характеристика легированного молибденом углеродного монокристаллического покрытия

Характеристика	Полученное в ходе испытаний значение
Наличие пор в слое	Нет
Наличие включений в слое	
Наличие дефектов на границе раздела слоев	
Наличие дефектов на границе раздела слоев с подложкой	
Толщина промежуточного слоя, нм	231,3

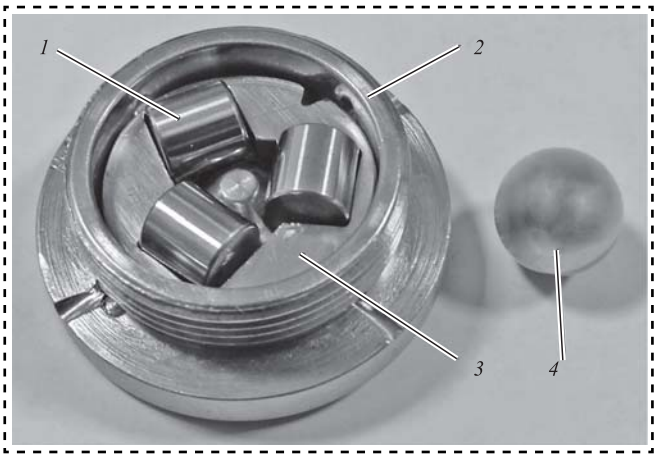

Рис. 3. Оправка в сборе (крышка снята):
1 — ролик; *2* — корпус оправки; *3* — сепаратор; *4* — верхний шарик

поверхности: шарики диаметром 12,7 мм из стали ШХ15 и ролики диаметром 8 мм и длиной 8 мм из стали 100Cr6. Шпиндель машины с зажатым шариком под нагрузкой 104 Н прижимается к сложенным равносторонним треугольником роликам, установленным в оправке в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя. Частота вращения шпинделя 1 мин$^{-1}$. По значениям коэффициента трения судят об уровне антифрикционных свойств исследуемых материалов. Оправку помещают в масляную чашку. Продолжительность испытания покрытия — 60 мин. Такая методика позволяет надежно ранжировать по трибологическим характеристикам как смазочные среды, так и тонкие углеродные покрытия [9].

Испытания проводили в трех модельных смазочных средах: инактивной, поверхностно-активной и химически активной. В качестве инактивной среды использовали полиальфаолефиновое масло ПАО-4, применяемое при изучении трения алмазоподобных покрытий [3], что позволяет сравнивать наши результаты с результатами зарубежных коллег. Модель поверхностно-активной среды представляет собой 1%-ный раствор олеиновой кислоты (ОК) в масле ПАО-4, а моделью химически-активной среды служит 1%-ный раствор присадки дитиокарбамата молибдена (ДТКМо) в том же масле.

Результаты трибологических исследований представлены на рис. 4 в виде зависимостей

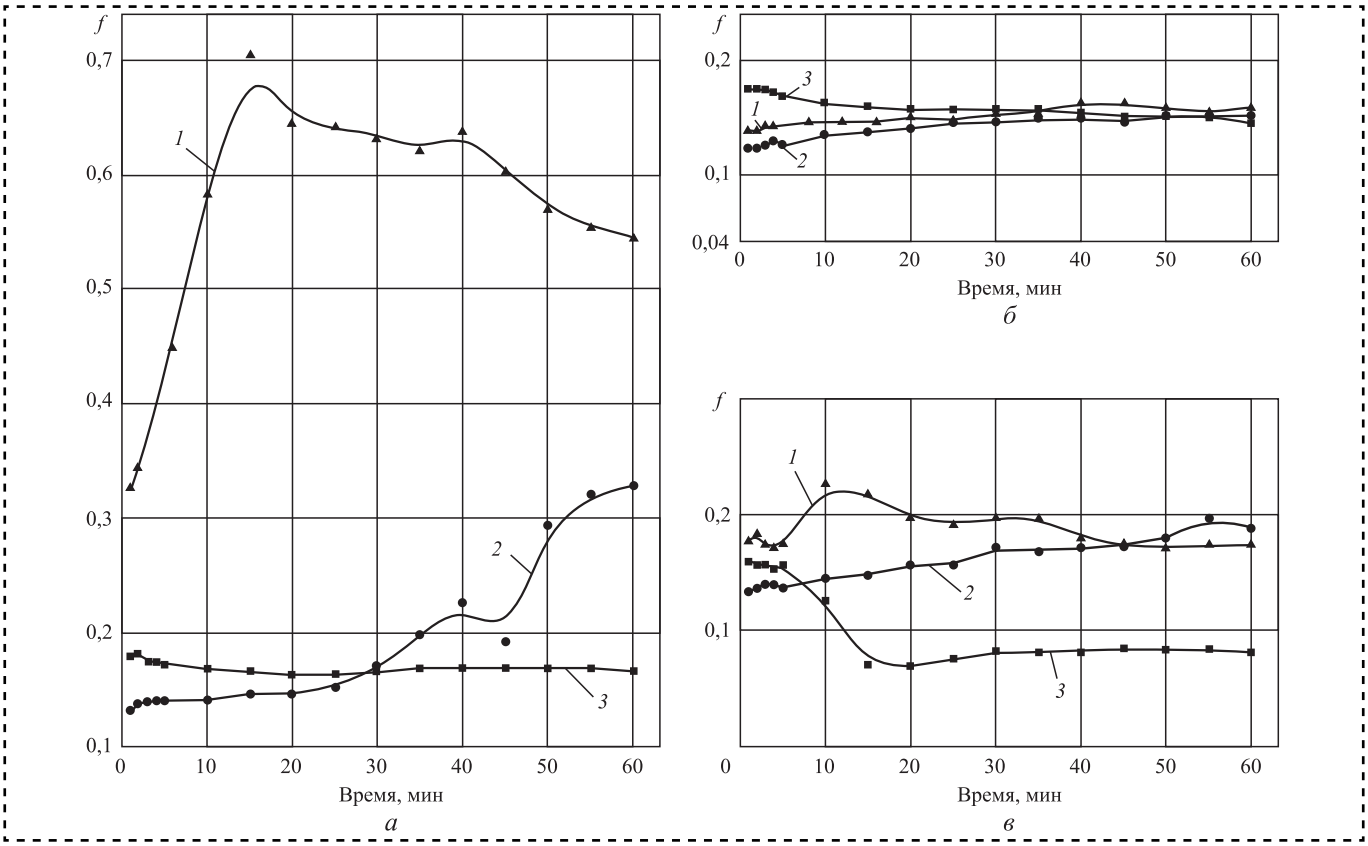

Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний:
1 — сталь по стали, *2* — сталь по покрытию МКУ; *3* — сталь по покрытию МКУ + Mo в средах: *а* — ПАО-4; *б* — ПАО-4 + 1 % ОК; *в* — ПАО-4 + 1 % ДТКМо

коэффициента трения от продолжительности испытаний.

В среде инактивного масла ПАО-4 как покрытие МКУ (кривая *2*), так и МКУ + Mo (кривая *3*), заметно снижают коэффициент трения по сравнению с трением стали по стали (кривая *1*) (рис. 4, *а*).

В смазочной среде ПАО-4 + 1 % ОК пары трения сталь—сталь, сталь—МКУ покрытие и сталь—МКУ + Mo покрытие имеют приблизительно одинаковые антифрикционные свойства (коэффициенты трения порядка 0,15), что свидетельствует о преобладающем влиянии при формировании граничного смазочного слоя поверхностно активного вещества (рис. 4, *б*). Разница в коэффициенте трения наблюдается только на начальном этапе испытаний, когда происходит приработка поверхностей.

В смазочной среде ПАО-4 + 1 % ДТКМо (рис. 4, *в*) поведение пар трения различно, однако коэффициент трения пар трения сталь—сталь и сталь—МКУ покрытие со временем выравнивается. В случае с парой трения сталь—МКУ + Mo покрытие коэффициент трения снижается и через 15 мин после начала испытаний до 0,08. Это можно объяснить только следствием смазочного действия дисульфида молибдена, образовшегося на поверхности раздела контактирующих тел как продукта взаимодействия серы, содержащейся в присадке ДТКМо, с молибденом, содержащимся в покрытии, что косвенно подтверждает результаты В. Подгорника [4, 10], полученные в серосодержащей смазочной среде при трении стали по углеродному покрытию, легированному вольфрамом.

Заключение

Легирование МКУ-покрытия молибденом приводит к изменению структуры покрытия с монокристаллической на поликристаллическую.

Прямая связь между антифрикционными характеристиками исследуемых смазочных сред и физико-механическими свойствами трущихся тел отсутствует, а антифрикционные характеристики смазочных сред определяются уровнем взаимодействия активных компонентов среды с активными компонентами трущихся тел.

Поверхностно-активная среда в качестве смазочной жидкости обеспечивает практически одинаковые антифрикционные свойства нелегированному МКУ покрытию и МКУ, легированному молибденом.

При трении стали по МКУ-покрытию, легированному молибденом, в серосодержащей химически активной среде наблюдается синергетический эффект в результате трибохимических процессов, происходящих в процессе испытания.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО "Монокарбон" за помощь в расшифровке дифракционных картин поверхностей исследуемых образцов покрытий.

Библиографический список

1. **Tribology** of Diamond-like Films. Fundamental and Applications / Ed. by C. Done and A. Erdemir. NY: Springer Science, 2008. 662 p.

2. **Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., Matveenko V.N.** To the new concept of green tribology // Journal of Material Science and chemical Engineering. 2017. Vol. 5. P. 175—187.

3. **Boundary** lubrication characteristics of metal-containing diamond-like carbon films with Poly Alpha Olefin lubricant / S. Miyake et al. // Japan Society of Iridologists: Tribology Online. 2008. Vol. 3. № 5. P. 310—315.

4. **Podgornik B., Hainsworth S.V.** Low-friction behavior of boundary lubricated diamond-like coating contained tungsten // Thin solid films. 2005. Vol. 476. P. 92—100.

5. **Levchenko V.A., Buyanovsky I.A., Zakarov K., Bolshakov A.N., Matveenko V.N.** Superhard carbon coatings and boundary lubrication / Mohd Fadzli Bin Abdollah et al. // Proceedings of Mechanical Engineering Research Day. 2017. P. 342—343.

6. **Патент РФ** № 2230238, МКИ[7] F 16 C 33/04. Антифрикционное покрытие / Левченко В.А., Матвеенко В.Н., Дроздов Ю.Н. и др. Опубл. 10.06.2004. Бюл. № 16.

7. **Твердые** углеродные покрытия и граничная смазка стальных деталей / Ю.Н. Дроздов и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 4. С. 55—63.

8. **Буяновский И.А., Лашхи В.Л., Самусенко В.Д.** Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2017. № 2. С. 28—33.

9. **Буяновский И.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д., Левченко В.А.** Методика трибологических испытаний тонких твердых покрытий стальных деталей на четырехшариковой машине // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева, серия: Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования. Новомосковский институт (филиал). Новомосковск, 2016. Вып. № 11 (32). С. 3—6.

10. **Combination** of DLC coatings and EP additives for improved triboligical behavior of boundary lubricated surfaces / B. Podgornik et al. // Wear. 2006. Vol. 261. № 1. P. 32—40.

УДК 629.114.2-235

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

Разработка главных фрикционов с металлокерамическими дисками с новыми материалами трения в трансмиссиях гусеничных машин и математической модели нагружения фрикционного материала

Предлагаемое техническое решение относится к области порошковой металлургии и может быть использовано при изготовлении главных фрикционов (ГФ) и заготовок фрикционных накладок тормозных и фрикционных устройств трансмиссий гусеничных машин (ГМ), преимущественно из материалов сухого трения.

Заготовки плоской фрикционной накладки состоят из металлического каркаса с покрытием и припеченной к нему порошковой прессовки с новыми фрикционными материалами, изготавливаются методами раздельного прессования и спекания под давлением и динамического горячего прессования (ДГП), для которого между покрытием каркаса и прессовкой вводится напыленный подслой из карбонильного железа.

Предлагаемое техническое решение повышает эксплуатационные свойства ГФ за счет использования новых фрикционных материалов на накладках ведомых дисков и способа их изготовления.

The proposed technical solution falls within the domain of the powder metallurgy and can be used in the manufacturing of the main clutches (MF) and stock of the friction linings of brake and clutches of caterpillar vehicles transmissions (CM), mainly from materials with unlubricated friction. The flat friction lining stock consists of a metal frame with a coating and a powder pressing baked to it with advanced friction materials, that manufactured by separate pressing and pressure sintering method, and by dynamic hot pressing (DHP) method, when a sprayed-on carbonyl iron coat layer is introduced between the coating of the frame and pressing. The proposed technical solution increases the maintainability of the MF due to introduction of advanced friction materials with unlubricated friction on the pads of the driven disks and new manufacturing methods.

Ключевые слова: главный фрикцион, накладка фрикционная, заготовка, каркас, прессование, спекание, давление, сухое трение, ДГП.

Keywords: main friction clutch, friction pad, blank, frame, pressing, sintering pressure, dry friction, DHP.

В коробках передач ГМ для отключения трансмиссиии от двигателя, обеспечения трогания и переключения передач широко применяют ГФ с дисками сухого трения с кольцевыми формованными асбофрикционными накладками с радиальными канавками для выноса продуктов износа с поверхности трения из материала НСФ-2А на комбинированном связующем, работающими по стальному кольцевому контртелу при длительном воздействии температуры до 160 °С, при кратковременном — до 300 °С (средняя температура за 10 с). В таких конструкциях иногда устанавливают автоматы регулировки зазора в приводе управления [1].

Материал НСФ-2А обладает хорошей прирабатываемостью и высокими фрикционными характеристиками, но имеет недостаточно высокие показатели по износостойкости и термостойкости, особенно в интервале температур 100...300 °С. Как показывает опыт эксплуатации машин, в отдельных случаях из-за повышенного износа ведомых дисков ГФ с асбофрикционными накладками наблюдается недопустимое снижение коэффициента запаса ГФ и, как следствие, выход его из строя.

В процессе эксплуатации ГФ осевое сжатие фрикционного пакета уменьшается из-за износа фрикционного материала и усадки рабочих пружин ГФ от высокой температуры. Соот-

ветственно, уменьшается коэффициент запаса момента трения из-за изменения осевой силы рабочих пружин и из-за нестабильности характеристик фрикционной пары. При этом эксплуатационный износ трущихся поверхностей увеличивается. Особенно часто эти недостатки возникают при эксплуатации ГМ с большой удельной мощностью. В этих условиях асбофрикционный материал теряет свои механические и фрикционные свойства, расслаивается, обугливается, крошится и разрушается.

Один из путей повышения надежности и долговечности работы ГФ — применение металлокерамических материалов — спеченных порошковых фрикционных материалов на железной основе для сухого трения при изготовлении фрикционных дисков, работающих со стальными контртелами при высоких температурах на фрикционном контакте. Эти материалы обладают большой прочностью, твердостью, выдерживают большие нагрузки и температуру (до 1000...1200 °С) [2].

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

Цель работы — определение работоспособности ГФ с новыми спеченными порошковыми фрикционными материалами на железной основе для сухого трения на накладках ведомых дисков трения и серийными стальными контртелами, износа фрикционных пар, надежности и долговечности ГФ. Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины.

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

$$\frac{G\varphi R_{\text{вк}}}{i_{\text{бп}} i_{\text{I}} \eta_{\text{трI}}} > \left(M_{\text{дв}}^{\max} + I_{\text{дв}}\ddot{\varphi}_{\text{вщ}}\right) =$$

$$= \mu P R_{\text{ср}} z < \left[\tau_{\text{кр}}\right] 0,2 D_{\text{н}}^{3}\left(1 - \frac{D_{\text{в}}^{4}}{D_{\text{н}}^{4}}\right),$$

где G — вес ГМ;

φ — коэффициент сцепления гусениц с грунтом;

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

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

i_{I} — передаточное число механизма передач и поворота на первой передаче;

$\eta_{\text{трI}}$ — КПД трансмиссии на первой передаче;

$V_{\text{дв}}^{\max}$ — максимальный крутящий момент двигателя;

$I_{\text{дв}}$ — момент инерции частей двигателя, приведенный к ведущим элементам ГФ;

$\ddot{\varphi}_{\text{вщ}}$ — ускорение ведущих частей двигателя;

μ — коэффициент трения;

P — нормальная сила;

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

z — число пар трения;

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

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

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

С помощью математической модели вычисляют напряжения $\tau_{\text{кр}}$ при кручении сопряжения "фрикционный материал — стальная основа". Результаты вычисления сравнивают с результатами экспериментальных испытаний.

Общий вид ГФ с новыми фрикционными дисками представлен на рис. 1, а испытуемые фрикционные диски — на рис. 2.

ГФ устанавливают в четырехскоростной коробке передач транспортной ГМ с удельной мощностью свыше 30 л.с./т. Наружный диаметр плоскости трения ГФ D_{max} = 380 мм, внутренний диаметр плоскости трения D_{min} = 290 мм, толщина диска $b = 11_{-0,27}$ мм. Отношение ширины плоскости трения к радиусу трущейся поверхности $B/R_{ср}$ = 0,237.

В ГФ использовали следующие сплошные контртела:

диск нажимной — сталь марки 45Х (ГОСТ 4543—71), НВ 262...311;

диск ведущий — сталь марки 65 (ГОСТ 14959—79), НВ 262...311;

маховик двигателя — сталь марки 40Х (ГОСТ 4543—71), НВ 255...302.

Для накладок использовали стальные плоские каркасы толщиной 2 мм с покрытием Н18М. Накладки прошлифованы с рабочей стороны и с привалочной стороны каркасов. Несущие диски толщиной 3 мм под накладки трения изготовлены из серийных заготовок и имели плавающее крепление к накладкам через специальное заклепочное соединение. Радиальное и окружное перемещение накладки относительно несущего диска — 1 мм, осевое перемещение — 0,2 мм.

Фрикционные накладки на дисках трения оснащены спеченными фрикционными материалами на железной основе СМК-137 и СМК-07 — совместные разработки ИПМ АН Украины и ВГТЗ. Физико-механические свойства испытуемых фрикционных материалов представлены в табл. 1.

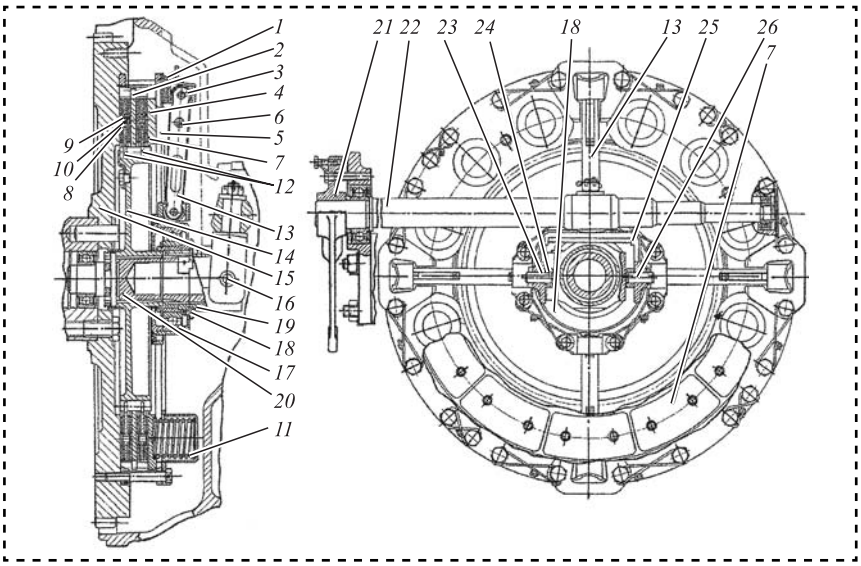

Рис. 1. Главный фрикцион:
1 — барабан ведущий; *2* — диск ведущий; *3* — ось; *4* — диск нажимной; *5* — каркас накладки; *6* — ось; *7* — накладка фрикциона; *8* — шайба; *9* — втулка; *10* — заклепка; *11* — пружина; *12* — диск несущий; *13* — рычаг; *14* — барабан ведомый; *15* — маховик двигателя; *16* — ось; *17* — шарикоподшипник; *18* — втулка; *19* — кронштейн; *20* — вал ведомый; *21* — рычаг; *22* — валик; *23* — сухарь; *24* — ролик; *25* — вилка; *26* — ось

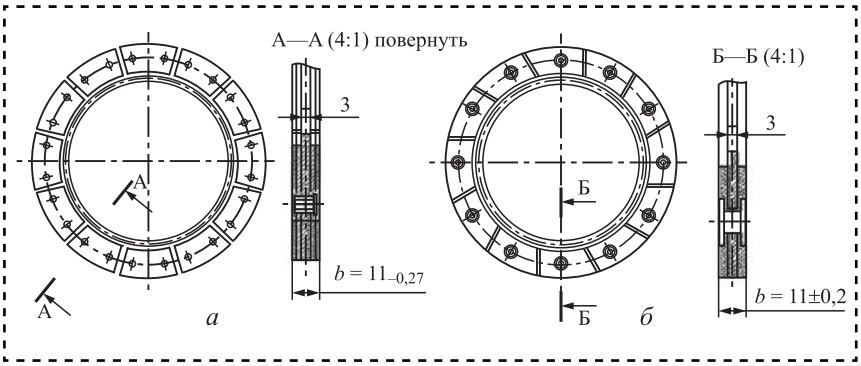

Рис. 2. Фрикционные диски ГФ:
а — металлокерамический; *б* — асбофрикционный

Таблица 1

Физико-механические свойства фрикционных материалов

Материал	Твердость НВ, кгс/мм^2 (МПа)	Пористость, %	Плотность, г/см^3	Адгезионная прочность, МПа	Допустимое среднее удельное давление при сухом трении, МПа
НСФ-2А*	17...27 (167...265)	—	1,9	—	0,4
СМК-07	40...55 (392...539)	8...10	4,31	>22	1,2
СМК-137	47,5...55 (466...539)	5...10	6...6,2	>22	1,2

* Серийный

Математическая модель расчета главного фрикциона трансмиссии легкой ГМ

Момент трения ГФ:

$$M_{ф} = \beta M_{дв\,max} = \mu P R_{ср} i,$$

где β — коэффициент запаса ГФ.

Удельное давление на плоскостях трения:

$$q = \frac{P'}{\pi\left(R_{н}^2 - R_{в}^2\right)},$$

где P' — результирующая сил, действующих на нажимной диск (с учетом центробежных сил);

$R_{н}$ — наружный радиус поверхности трения;

$R_{в}$ — внутренний радиус поверхности трения.

Коэффициент запаса ГФ во включенном (диски не проскальзывают) $\beta_{вк}$ и в буксующем (диски проскальзывают) $\beta_{ск}$ режимах работы:

$$\beta_{вк} = \frac{PiR_{ср}\mu_0}{M_{дв\,max}};$$

$$\beta_{ск} = \frac{PiR_{ср}\mu_{ск}}{M_{дв\,max}},$$

где μ_0 — коэффициент трения статический;

$\mu_{ск}$ — коэффициент трения динамический.

Максимальная скорость скольжения дисков трения

$$v_{ск\,max} = \frac{\pi R_{н} n_{дв\,max}}{30},$$

где $n_{дв\,max}$ — максимальные обороты двигателя.

Работа буксования

$$A_{ск} = \frac{J_1 J_2 n_1^2}{180\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\left[J_2 + J_1 \frac{\beta - M_{с}/M_{дв\,max}}{\beta - 1}\right]},$$

где J_1 — момент инерции двигателя и ведущих деталей ГФ;

J_2 — момент инерции ведомых деталей ГФ (моменты инерции вращающихся деталей трансмиссии и момент инерции поступательного движения ГМ на II передаче);

n_1 — число оборотов двигателя при $M_{дв\,max}$;

$$J_2 = \delta \frac{G}{g}\left(\frac{R_{вк}}{i_{т}}\right)^2;$$

$$M_{с} = \frac{f_{с} G R_{вк}}{i_{т}\eta_{м}},$$

где δ — коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс деталей трансмиссии и гусеничного движителя, $\delta = 1{,}2 + 0{,}002\, i_{т}^2$;

g — ускорение свободного падения;

$i_{т}$ — передаточное число трансмиссии от ГФ до ведущих колес;

$M_{с}$ — момент сопротивления движению, приведенный к ведомым дискам ГФ:

$f_{с}$ — коэффициент суммарного сопротивления движению ГМ;

$\eta_{м}$ — КПД машины.

Время буксования

$$t_{ск} = \frac{\omega_{отн} J_1 J_2}{M_{дв\,max}\left[J_1\left(\beta - M_{с}/M_{дв\,max}\right) + J_2\left(\beta - 1\right)\right]},$$

где $\omega_{отн} = \frac{\pi n_1}{30}$.

Удельная работа трения

$$A_{уд} = A_{ск}/F,$$

где F — площадь трущихся поверхностей.

Средняя по толщине дисков температура фрикционной обшивки:

$$\tau_{оф} = \frac{(1 - \gamma')A_{ск}}{EF\delta_2 c\gamma_2},$$

где E — механический эквивалент теплоты;

δ_2 — толщина фрикционной обшивки;

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

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

где λ_1 — коэффициент теплопроводности металла;

λ_2 — коэффициент теплопроводности фрикционного материала;

γ_1 — удельный вес металла;

γ_2 — удельный вес фрикционного материала;

c_1 — теплоемкость металла;

c_2 — теплоемкость фрикционного материала.

Условия работы ГФ на изделиях (расчетные значения)

Работа трения, кДж	76
Удельная работа трения, Дж/см^2	40
Время буксования, с	1
Момент инерции ведомых частей ГФ, ведущего, промежуточного валов КП и жестко связанных с ними деталей, приведенный к оси промежуточного вала, кг·м^2	0,1865
Момент инерции масс вращающихся деталей, связанных с валом, и массы изделия, приведенной к промежуточному валу КП для III и IV передач, кг·м^2	47,1 и 105
Время синхронизации при переключении передач с III на IV и обратно соответственно, с	0,152 и 0,153

Число включений (выключений) за ресурс 42 000
Максимальная линейная скорость скольжения фрикционной накладки относительно контртела, м/с. 47,8
Максимальное удельное давление на поверхности трения, МПа 0,15
Температура в зоне трения, °С:
средняя продолжительная . . . . . 300...400
допустимая максимальная (кратковременно) . . 700
Диапазон рабочих температур, °С . . . . . −60...+700

Значения работы трения, удельной работы трения и времени буксования соответствуют трудным условиям, например, троганию машины со второй передачи.

Результаты эксплуатационных испытаний ГФ сухого трения приведены в табл. 2.

Эксплуатационные испытания на транспортных ГМ главных фрикционов с накладками из материала СМК на дисках трения и стальными контртелами подтвердили высокую эффективность, надежность и значительное увеличение долговечности узла в трудных условиях движения при частых изменениях температуры.

По результатам испытаний ГМ на практике для фрикционных материалов типа СМК накладок ведомых дисков ГФ можно рекомендовать адгезионную прочность $\left[\tau_{кр}\right] \geqslant 22$ МПа. Для повышения надежности сцепления прессовки с каркасом, плотности и механической прочности, технологичности заготовки накладки и упрощения термического оборудования для ее изготовления (что упрощает организацию серийного производства фрикционных накладок), повышения надежности и долговечности работы узлов трансмиссий легких ГМ предлагается новый высокопроизводительный способ изготовления накладок из порошкового материала.

Суть нового метода состоит в том, что в заготовку фрикционной накладки введен напыленный подслой (между покрытием каркаса и порошковой прессовкой) из карбонильного железа или никеля. При этом накладка изготавливается следующими технологическими приемами:

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

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

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

г) динамического горячего прессования (ДГП) в штампе при давлении 500...700 МПа нагретой накладки с дальнейшим ее охлаждением на воздухе.

Новые заготовки фрикционных накладок с материалом на железной основе типа ФМК-79 ДГП для сухого трения, изготовленные методом ДГП через подслой из карбонильного железа, по сравнению с накладками, изготовленными по известному способу — раздельное прессование и спекание под давлением, имеют прочность соединения фрикционного слоя со стальной основой в 2—2,5 раза и твердость фрикционного слоя в 1,1—1,5 раза выше. При этом производительность изготовления на-

Таблица 2

Результаты эксплуатационных испытаний ГФ

Пробег, км	Диски трения		Контртела — диски ведущий/нажимной		Место испытаний
	Материал	Износ поверхности трения на R_{max}, мм	Износ поверхности трения на R_{max}, мм	Коробление a, мм	
6000	НСФ-2А	1,5...2,5	—	0,75/4,2	Юг России
3500	НСФ-2А	0,9	—	0,25/1,5	Юг России
15 100	СМК-07	0,45	0,135/0,1	0,5/1,9	Юг России
7550	СМК-07	0,31	0,1/0,03	0,55/1,1	Литва
25 000	СМК-137	0,31	0,1/—	0,8/—	Центр России
30 000	СМК-137	0,35	0,1/—	0,9/—	Центр России

Таблица 3

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

Фрикционный материал	Массовая доля элементов, %	Толщина заготовки, мм	Твердость, кгс/мм^2 (МПа) (шкала HRF)	Пористость, %	Плотность, г/см^3
ФМК-79 ДГП	C 6; S 0,7; Cu 10; B 1,6; Si 3,0; Fe — остальное	5,9...6,3	83...105,5 (814...1035)	5...8	5,2...5,6
МКВ-50А ДГП	C 9,5...9,8; S 1,0...1,2; Cu 9,8...9,9; B 3,5...3,7; Si 3,5...3,7; асбест 3,1...3,3; Fe — остальное	5,27...5,5	60...80 (588...785)	5...8	5,0...5,1
СМК-137П ТУ 356-5—88 (получен раздельным прессованием и спеканием под давлением при температуре 1000...1100 °С в ИПМ АН Украины)	C 11...13; Mg 6...8; Cu 20...22; концентрат Mo 2...4; электрокорунд 3...5; Fe 42...44; мочевина 9...11	5,5...6,0	20...30 (HB) (196...294)	20...25	5,2

кладки увеличивается в 1,5—3 раза, повышаются механическая прочность и технологичность деталей и упрощается термическое оборудование для стабильного высокотемпературного спекания, так как вместо малопроизводительных вертикальных садковых термических печей, не обеспечивающих стабильности высокотемпературного спекания под давлением, применяют высокопроизводительные проходные горизонтальные печи для спекания без давления, обеспечивающие стабильные характеристики предварительного спекания.

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

Материал ФМК-79 ДГП успешно прошел эксплуатационные испытания на фрикционных накладках дисковых остановочных тормозов (ОТ) ГМ с большой удельной мощностью и массой 13...18 т. Подтверждена надежность сцепления порошкового материала с каркасом накладки ведомого диска ОТ, которая была заложена при создании фрикционного узла. Материал ФМК-79 ДГП может быть использован как унифицированный материал для фрикционных узлов механической трансмиссии ГМ — главный фрикцион, бортовой фрикцион, ленточный остановочный тормоз, дисковый остановочный тормоз.

Выводы

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

Библиографический список

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

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

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

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

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

УДК 621.891

П.А. Курапов, *д-р техн. наук*
(НИИ технологии и организации производства двигателей — филиал "НИИД" АО НПЦ Газотурбостроения "Салют", Москва)
E-mail: q-paul@bk.ru

Оценка трения в контакте шероховатых тел

Рассмотрена аналитическая оценка параметров трения в контакте шероховатых тел с учетом влияния микрогеометрии поверхности и адгезионных свойств. Расчет сопоставлен с опытными данными.

Analytical assessment of parameters of friction in contact of rough bodies taking into account influence of microgeometry of a surface and adhesive properties is considered. Calculation was compared with skilled data.

Ключевые слова: коэффициент трения, дискретный контакт, адгезия, микрогеометрия.

Keywords: friction coefficient, discrete contact, adhesion, microgeometry.

Двойственная адгезионно-деформационная природа внешнего трения реальных шероховатых тел определяет необходимость при вычислении коэффициентов трения учитывать микрогеометрию поверхности находящихся в контакте деталей и адгезионные параметры, связанные со свойствами материалов и наличием смазочных пленок в дискретных контактах микронеровностей. Кроме того, для расчета адгезионной силы сопротивления перемещению, необходимо учитывать физико-механические свойства контактирующих тел при оценке формирования площади фактического контакта.

Трибологи предложили различные модели контакта шероховатых тел при упругом и пластическом деформировании микронеровностей, образующих множество дискретных площадок фактического контакта в парах трения. Среди таких моделей рассмотрим контактирование микронеровностей шероховатой поверхности (рис. 1), вершины которых представлены сферическими сегментами (рис. 2), при нахождении точки контакта в рабочей зоне выступов [1]. Сопротивление смещению верхнего сегмента с учетом площадки контакта ΔA_r можно записать в следующем виде:

$$P = q(\cos\beta)^{-1}\,\mathrm{tg}\,\alpha + q(\cos\beta)^{-1}\,\mu \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \left[\mathrm{tg}(\alpha+\rho)\,\mathrm{tg}\,\alpha + 1\right] + N_o\mu \leftrightarrow \Delta A_r\,(\cos\alpha)^{-1}, \quad (1)$$

где q — нагрузка на единичный контакт неровностей;

N_o — контактное адгезионное взаимодействие в отсутствие внешней сжимающей силы;

μ — адгезионный пьезокоэффициент;

$N_o\mu \leftrightarrow = \tau_o$;

τ_o — адезионный параметр определяемый опытным путем.

Запишем выражение для фактического контактного давления $q/\Delta A_r = p_r$ и разделим уравнение (1) на q. Тогда коэффициент трения получим в следующем виде:

$$f = \mathrm{tga}\,\alpha/\cos\beta + \\ + \mu'\left[\mathrm{tg}(\alpha+\rho)\,\mathrm{tg}\,\alpha + 1\right]/\cos\beta + \tau_o/p_r\cos\alpha, \quad (2)$$

где $\rho = \mathrm{arctg}\,\mu'$ — угол трения.

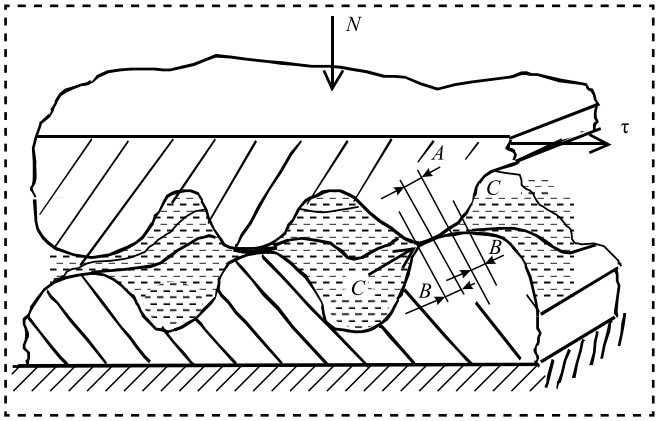

Рис. 1. Схема контакта шероховатых тел под нагрузкой *N*:
A — область контакта граничного режима смазывания;
B, *C* — области смазочного материала

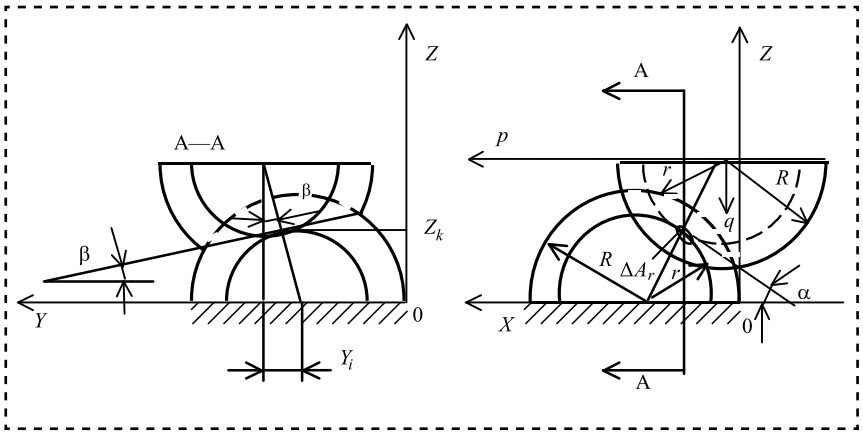

Рис. 2. Модель контакта микровыступов

В данном полиноме (2) первый член характеризует механическое сопротивление движению с учетом уклонов микровыступов поверхности. Второй член характеризует связь адгезионных и механических параметров сопротивления перемещению, а третий — влияние адгезионного сопротивления с учетом уровня фактического давления на контакте.

Микронеровности шероховатой поверхности находятся на деформируемом основании и их вершинная часть воспринимает нагрузку, распределенную в контакте по микровыступам. Нагрузка передается основанию с учетом характера нагружения и ее распределения по микронеровностям. Преимущество данной модели — возможность ее использования для оценки трения, как при упругом, так и при пластическом контакте взаимодействующих микровыступов. Эксперименты показывают, что в условиях нагрузок, не вызывающих задира поверхности, пластический контакт образуется в локальных точках контакта микронеровностей, не нарушая их форму. При наличии приработочного износа формируется установившаяся шероховатость поверхности, а фрикционные параметры контакта микронеровностей в таком случае должны учитывать микрогеометрию после приработки.

Выражение (2) написано для модели единичного контакта и для его использования в практических расчетах, применительно к реальным парам трения, необходимо все параметры брать с учетом строения микрогеометрии и физических свойств материалов, а также использовать усредненное фактическое давление в зоне фактического контакта. Так, адгезионные коэффициенты могут быть взяты по результатам опытов на образцах материалов в паре трения, проводимых на одношариковом трибометре [2] или на другом аналогичном приборе, а также из справочников. Значение уклонов микрорельефа получают на основании профилометрирования исследуемых поверхностей. Ранее уклоны микронеровностей в силу их малости для ряда видов обработки поверхности не учитывали в расчетах коэфициента трения. Позднее, когда стали выпускаться профилометры с использованием компьютеризованного расчета параметров микрогеометрии, предлагалось качественно судить о величине трения по одному уклону (α), что может использоваться лишь для грубой сравнительной оценки. Как видно из выражения (2) этот угол для второго члена складывается с углом трения $\operatorname{arctg}\mu'$, и это уже величина существенная. Кроме того, блоки обработки измерительной информации современных профилометров сразу после измерения выдают распечатки по средним арифметическим и среднеквадратичным значениям этих и других параметров, что обеспечивает более обоснованную оценку уровня трения на множественном контакте, состоящем из большого числа пар контактирующих неровностей. Расчеты параметров трения с использованием первых двух членов формулы (2) показали удовлетворительное совпадение с опытными данными [3].

Для количественной оценки уровня трения по полной формуле (2) воспользуемся значениями среднеквадратичных уклонов α и β, как более представительными, более обоснованно характеризующими массив микроконтактов, принимая во внимание статистический разброс этих параметров.

Фактическое контактное давление на микронеровностях p_r может быть определено с использованием методов аналитической оценки контактных характеристик шероховатых тел [2] или с использованием моделирования шероховатой поверхности и численной оценки таких характеристик [4]. Можно воспользоваться методом, основанным на модели сближения шероховатой поверхности с недеформируемой гладкой поверхностью. Фактическое контактное давление двух шероховатых поверхностей эквивалентно фактическому давлению, рассчитанному по этой модели [5]. В такой модели расчет фактической площади контакта строится

с учетом сформированной при трении контурной площади, величина которой может составлять некоторую долю от номинальной [5]. В этом случае необходима методика учета контурной площади. В предлагаемом ниже примере расчета коэффициента трения использован метод измерения контурной площади по разнице цветовых оттенков таких площадей на рабочей поверхности трения на оптическом профилометре ALICONA infiniti Focus.

Рассмотрим пример расчета коэффициента трения по предлагаемому методу и сопоставим расчеты с результатами опытов. В опытах использовали модель подпятника, имевшего плоскую пяту из стали ШХ15, по которой скользила деталь с тремя контактными образцами из бронзы БРАЖМц10-3-1,5 без смазочного материала. Номинальная площадь контакта каждого образца — 20 мм^2. Обе детали устанавливали соосно и при вращении измеряли силу трения при различной нагрузке, определяли коэффициент трения, который затем сравнивали с расчетными значениями (рис. 3). Адгезионные параметры брали из независимого источника [2].

На рис. 3 две расчетные зависимости изменения коэффициента трения от давления имеют очень слабый наклон относительно оси давлений, что характеризует наименьший вклад третьего члена формулы (2) в уровень трения.

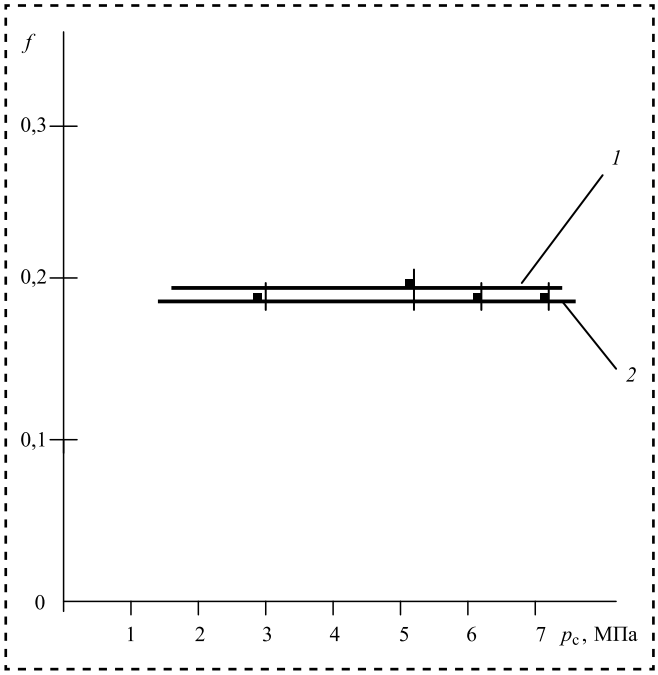

Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от контурного давления:
1, *2* — расчетные зависимости

Наибольший вклад в коэффициент трения вносит второй член этой формулы. Ощутимое падение коэффициента трения от давления следует ожидать при больших значениях контурной и фактической площадей контакта. Например, при трении эластомерных поручней эскалатора по направляющим. Линия *1* на рис. 3 соответствует расчетам с использованием параметров микрогеометрии поверхности трения, измеренным с помощью профилометра ALICONA infiniti Focus, а линия *2* — расчетам по данным измерений микрогеометрии на щуповом приборе "Талисурф ИНТРА" (Taylor Hobson). Расчеты трения с использованием данных о микрогеометрии, полученных на оптическом профилометре, дают более высокие значения коэффициента трения. Это можно объяснить тем, что такие приборы точней определяют характеристики микрогеометрии, не внося погрешности за счет радиуса кривизны щупа как у щуповых профилометров. Тем не менее обе линии расчетов вписываются в диапазон разброса данных опытов, что говорит как о качественном, так и количественном соответствии данным экспериментов.

Предложенный подход к расчету трения шероховатых тел в парах трения и сопряжениях может быть использован в научной и инженерной практике. Его удобно применять для оценки трения в случае граничной смазки, в отсутствие смазочных материалов, а также для оценки граничной составляющей трения при полужидкостной смазке.

Библиографический список

1. **Курапов П.А.** О количественной оценке параметров трения в развитие положений молекулярно-механической теории // Машиноведение. 1990. № 1. С. 28—34.

2. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

3. **Курапов П.А., Новиков В.С., Федош Д.А.** Оценка качества финишной обработки зубчатых колес на основе модели дискретного контакта шероховатых тел // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 1. С. 21—26.

4. **Болотов А.Н., Сутягин О.В., Рачишкин А.А.** Исследование топографии 3-мерных моделей шероховатых поверхностей с помощью компьютерного моделирования // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 29—41.

5. **Рудзит Я.А.** Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 215 с.

УДК 621.07

М.Ш. Мигранов, *д-р техн. наук,* **А.М. Мигранов**
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: migmars@mail.ru

Оценка износостойкости режущего инструмента с покрытиями

Представлены результаты экспериментальных исследований микротвердости, кривой нагружения — разгрузки. Определена работа упругой и пластической деформации для оценки износостойкости режущего инструмента с покрытием параметром диссипации микротвердости.

The results of experimental studies of microhardness, loading — unloading curve are presented. The work of elastic and plastic deformation to assess the wear resistance of the cutting tool to the coated parameter dissipation of microhardness is determined.

Ключевые слова: износ, трение, наноиндентация, микротвердость, упругая и пластическая деформация.

Keywords: wear, friction, nanoindentation, microhardness, elastic and plastic deformation.

Износостойкость физически осажденных покрытий (ФОП) зависит от целого ряда взаимозависимых механических и физических свойств. В последнее время широко применяют нанотехнологии для характеристики тонких покрытий [1—5]. Микротвердость — это основное механическое свойство в классических теориях износа, которое определяет износостойкость поверхности. Это верно для устойчивых (стабильных) условий износа, таких как износ при скольжении, но если на практике наблюдаются разнообразные режимы износов, то необходимо рассмотреть дополнительные характеристики.

Для повышения износостойкости инструмента обычно используют твердые покрытия. Режущие и штамповые инструменты — трибосистемы с большой нагрузкой, работающие в условиях интенсивной пластической деформации на поверхности. Для эффективного использования инструментов, например, необходимо сочетание высокой твердости и вязкости покрытий. В связи с этим важно разработать один или несколько параметров, которые позволили бы оценить комбинацию этих свойств. В качестве одного из таких параметров можно принять отношение твердости к модулю упругости (в виде коэффициента). Классификация материалов по отношению твердости к модулю упругости (H/E) дает очень близкое соответствие их классификации по износостойкости. Поэтому коэффициент H/E можно использовать в качестве характеристики, отражающей способность различных режущих инструментов сопротивляться износу [1, 2]. Впервые в работе [4] представлена зависимость износостойкости сверл с покрытием (AlTi)N—ФОП от коэффициента H/E. Высокое соотношение H/E обусловливает более низкую устойчивость инструмента во время сверлильных операций, когда преобладает адгезионный механизм износа. Этот результат показывает, что для инструментов, работающих с большой нагрузкой, в условиях интенсивной деформации контактных поверхностных слоев при трении, необходим резерв пластических свойств для повышения износостойкости инструментов с покрытием.

В данной работе представлен параметр, основывающийся на энергетическом подходе, связанный с износостойкостью покрытий и подобный по своему физическому смыслу коэффициенту H/E. Рассмотрим связь между измеренными характеристиками диссипации (рассеяния) и накопления (аккумуляции) энергии во время наноиндентации и параметрами трения и устойчивости твердых покрытий при различных условиях износа, соответствующих работе режущих инструментов и штампов.

Исследованы твердые TiN-покрытия, нанесенные ФОП-методом на основе рассеивания дугой с использованием установки ННВ 6.6-И1. Параметры нанесения: ток в дуге 50...160 А; напряжение смещения 150...350 В; температура нанесения — 500 °С. Использовали два типа инструментальных материалов подложки (нижних слоев): быстрорежущую сталь Р6М5 (HRC 64...66) и твердосплавные пластины (ТТ8К6).

Химический состав покрытий исследовали с помощью сканирующей электронной спектроскопии (ОЭС) на ESCALAB MK2 (VG) спектрометре. Фазовый состав и текстуру определяли методом РСА на дифрактометре DRON 3.0, осевую текстуру покрытий TiN — методами Харриса и полюсных показателей [6].

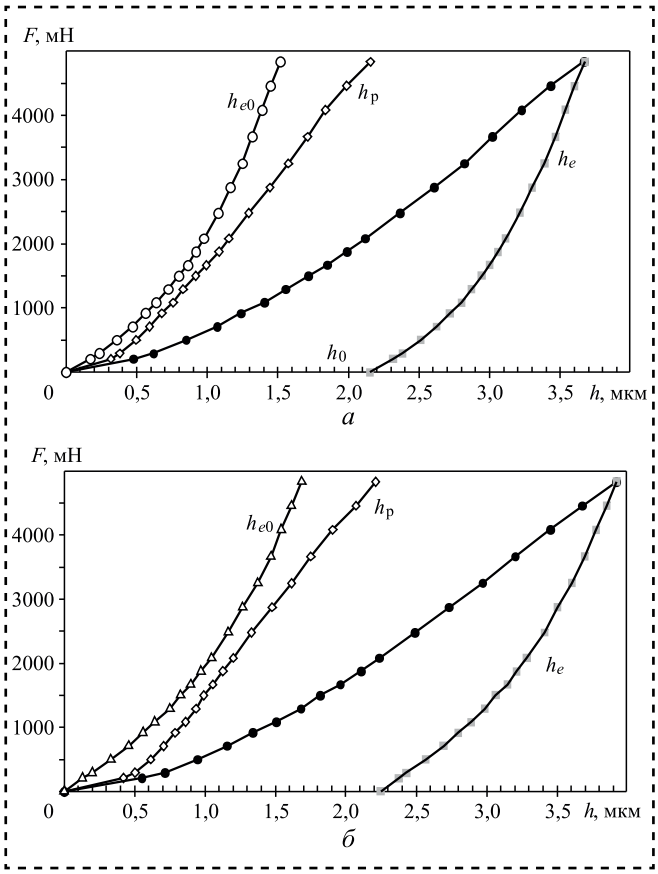

Рис. 1. Кривые деформирования при нагружении и разгрузке для ФОП TiN:

а — обычное покрытие; *б* — фильтрованное покрытие, *F* — последовательно увеличивающаяся нагрузка вдавливания, мН; *h* — текущая глубина вдавливания на кривой деформирования, мкм; h_e — глубина вдавливания на кривой разгрузки, мкм; h_{eo} — глубина упругого вдавливания, перемещенная к началу координат, мкм; h_p — глубина пластической деформации после завершения разгрузки, мкм, $h_p = h - h_{eo}$; h_0 — нулевая точка отсчета, мкм

Толщина покрытий, измеренная с помощью аппарата для сферического кратера: для покрытия TiN — около 10 мкм, TiAlN — 2,5 мкм.

Микротвердость и работу упругопластической деформации определяли на основе данных "нагрузка — перемещение", измеренных с помощью компьютерно-управляемого прибора наноиндентации MTI-3M с алмазным индентором Берковича. Перемещения вдавливания измеряли и затем строили кривые идентации. Для каждого образца проведено 30 измерений, которые затем усреднены статистическими методами. Разброс измерений микротвердости составил около 2 %. Для анализа использовали экспериментальную кривую деформации, максимально приближенную к вычисленной средней.

Микротвердость вычисляли по следующей формуле, ГПа:

$$\mathrm{HV} = F/26{,}43h^2,$$

где *F* — последовательно увеличивающаяся сила вдавливания, Н;

h — текущая глубина вдавливания на кривой нагружения (глубина упругой и пластической деформации), мкм.

Работу упругой и пластической деформации вычисляли по кривым нагружения (при вдавливании) (рис. 1). Для каждого образца кривые аппроксимированы с помощью полинома в третьей степени в Excel (Windows 98) с параметром определения $R^2 = 1$.

Суммарную работу *A* упругой и пластической деформации вычислили интегрированием кривой нагружения в диапазоне глубин перемещения от 0 до *h*:

$$A = \int F(h)dh.$$

При этом шаг интегрирования равен шагу нагружения 200 мН. Диапазон нагрузок составлял 0...5000 мН (см. рис. 1).

Работу упругой деформации A_{e0} определяли интегрированием участка, ограниченного кривой разгружения (после перемещения ее к началу координат (см. рис. 1)).

Работа пластической деформации A_p:

$$A_p = A - A_{e0}.$$

С помощью полученных данных подсчитан коэффициент K_e как отношение работы упругой деформации к общей работе деформации во время вдавливания:

$$K_e = A_{e0}/A.$$

Этот параметр принят как коэффициент упругой деформации (аккумуляции энергии).

Параметр рассеивания (энергетических потерь во время пластической деформации) можно вычислить с помощью формулы:

$$K_d = 1 - K_e.$$

Предлагаем назвать эту характеристику параметром диссипации микротвердости (ПДМ) покрытия.

По результатам нагружения и разгрузки получали кривую пластической деформации (см. рис. 1), при этом глубину пластической деформации определяли как:

$$h_p = h - h_{e0},$$

где h_{e0} — глубина индентации, определяемая от начала координат, мкм.

Каждая кривая имела свое собственное уравнение аппроксимации, полученное на основе экспериментальных данных (табл. 1). На кривой $F(h_p)$ можно видеть два участка с коэффициентами определения R^2 в диапазоне от 0,9997 до 0,9999. Когда уравнение кривой меняется, на кривой появляется точка перегиба. Первый участок характеризует поверхностный слой толщиной около 10 % от толщины покрытия, т.е. слой, характеризующий собственную микротвердость покрытий [4, 7]. Второй участок характеризует более глубокий слой — зону пластической деформации, в которой сказывается влияние материала основы. Точка перегиба кривых может быть источником важной информации для характеристики механических свойств покрытий. Основываясь на полученных данных, был вычислен ПДМ для поверхностного слоя толщиной около 10 % от толщины покрытия.

Натурные испытания инструментов с покрытиями проводили в реальных условиях резания металлов. Чтобы смоделировать адгезионный механизм износа, выбрали умеренные скорости резания. Режимы резания приведены в табл. 2. ФОП TiN, нанесенные с помощью дуги, испытывали при резании с четырехгранными быстросменными пластинами в условиях, моделирующих адгезионный и адгезионно-усталостный механизмы износа [3, 5]. Фильтрованные с помощью МДФ ФОП TiN испытывались в условиях торцевого фрезерования, моделирующих адгезионный износ [6].

Таблица 1

Уравнения аппроксимации для $F(h_p)$

Диапазон значений h, мкм	Уравнения
Обычное ФОП TiN	
$0 < h < 0{,}7575$	$F = 190{,}19\, h_p^{1{,}9315}$; $R^2 = 0{,}9997$
$0{,}7575 < h < 2{,}1535$	$F = -38{,}037\, h_p^3 + 175{,}95\, h_p^2 + 19{,}866\, h_p + 12{,}482$; $R^2 = 0{,}9999$
Фильтрованное ФОП TiN	
$0 < h < 0{,}986$	$F = 155{,}36\, h_p^{2{,}2918}$; $R^2 = 0{,}9999$
$0{,}986 < h < 2{,}242$	$F = -24{,}633 h_p^3 + 85{,}325 h_p^2 + 197{,}574\, h_p$; $R^2 = 1{,}0$

Таблица 2

Параметры резания стали 40Х твердостью 200НВ быстросменными пластинами из быстрорежущей стали с обычным ФОП TiN при продольном точении/торцовом фрезеровании

Параметр	Значение
Скорость резания, м/мин	45/50
Подача, мм/об	0,33/—
Ширина фрезерования, мм	—/10
Глубина, мм	1,0/3,0

Микротвердость TiN-покрытий, а также ПДМ зависят от давления азота в камере во время нанесения покрытия (рис. 2). На эти параметры значительно влияет фазовый состав покрытия [1, 2, 4]. Высокая микротвердость достигается, когда двухфазовый состав α-Ti + TiN превращается в трехфазовый α-Ti + Ti_2N + TiN.

По результатам экспериментальных исследований установлено:

— наиболее высокая износостойкость быстросменных пластин из быстрорежущей стали с покрытием TiN в области адгезионных и адгезионно-усталостных механизмов износа

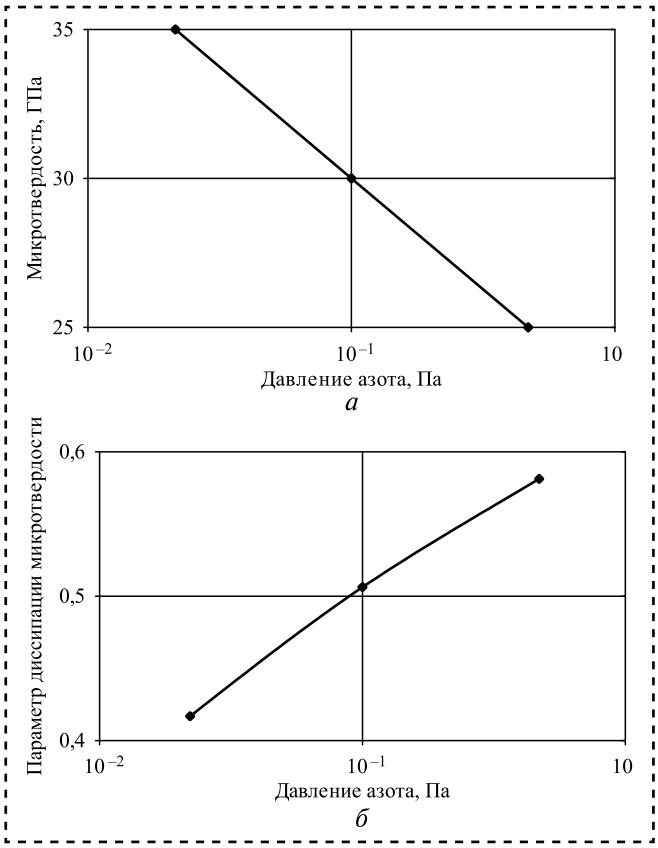

Рис. 2. Влияние давления азота в камере при нанесении ФОП TiN на:
а — микротвердость покрытия; *б* — параметр диссипации (рассеивания) микротвердости (ПДМ)

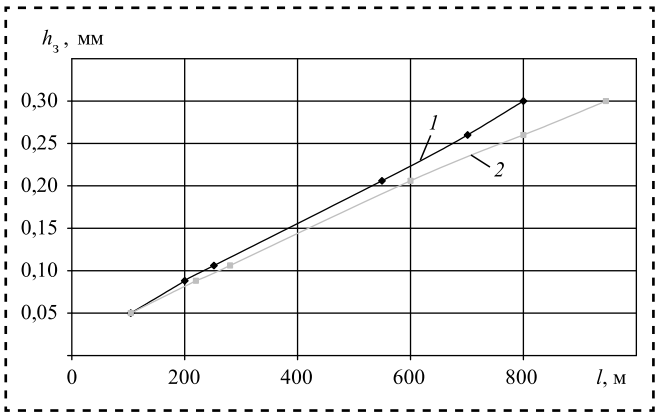

Рис. 3. Влияние пути резания на износ инструмента по задней поверхности:
1 — обычное покрытие TiN (микротвердость 29...30 ГПа; ПРМ = 0,56); *2* — фильтрованное покрытие TiN (микротвердость 28...29 ГПа, ПРМ = 0,66)

соответствует самому низкому параметру трения. Подобные испытания были выполнены в условиях торцового фрезерования с помощью твердосплавных пластин с покрытиями TiN. В этом случае доминирует адгезионный механизм износа [3]. Различные типы покрытий с высоким ПДМ демонстрируют более высокую износостойкость инструментов (рис. 3);

— существует связь между способностью нитридного ФОП рассеивать энергию пластической деформации (во время накопления энергии упругой деформации) с износостойкостью покрытия. Эту связь можно трактовать как параметр диссипации (рассеивания) микротвердости (ПДМ). Определены диапазоны ПДМ, представляющего собой отношение энергии диссипации к общей энергии упругопластической деформации во время нановдавливания, для различных условий, имеющих место при износе режущего инструмента.

Библиографический список

1. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.

2. **Vereschaka A.A., Migranov M.S.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 871. P. 159—163.

3. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.

4. **Characteristic** features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting / G.S. Fox-Rabinovich et al. // Wear. 1997. Vol. 206. P. 214.

5. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

6. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 327 с.

7. **Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O.** Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on HSS with high melting point compounds // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10. № 20. P. 9282—9286.

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук,* **М.И. Бойчук, А.А. Дюкин**
(Московский технологический университет)
E-mail: mikaeva@npo.lit

Сборка индустриального комплекса очистки воздуха от примесей

Описан индустриальный комплекс, предназначенный для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ. Представлены технические характеристики, устройство и сборка комплекса.

The industrial complex of air purification from impurities designed for air cleaning from fine-dispersed impurities and to reduce the air concentrations of malodorous substances are discribed. Technical characteristics, the device and assembly of the complex are presented.

Ключевые слова: сборка, устройство, комплекс, воздух, очистка, примеси, технические данные.

Keywords: assembly, device, complex, air, purification, impurities, technical data.

Воздух — это жизнь. Чистый воздух — это здоровье [1—3]. Комплекс очистки воздуха от примесей (маркировка взрывозащиты II Gb c b IIB T3 X) предназначен для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ (сероводород, аммиак, смесь природных меркаптанов и др.), многократно превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе населенных мест более чем на 95 % в точке выброса, и до концентраций ниже ПДК на границе санитарно-защитной зоны, рассчитанной согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" [4, 5]. Комплекс производит ООО Торговый дом "Лаборатория импульсной техники" (Москва). Работоспособность комплекса обеспечивается в следующих условиях: температура окружающего воздуха в интервале −45...40 °С; относительная влажность окружающего воздуха до 98 % при температуре +25 °С; температура очищаемого воздуха от +5...+40 °С. Климатическое исполнение комплекса У1, категория размещения — уличное по ГОСТ 15150—69.

Технические характеристики блок-контейнера

Присоединительные размеры, мм:	
вход (диаметр)	700
выход	450×450
Условное давление внутри камеры	Разрежение
Транспортные габаритные размеры, длина × ширина × высота, мм	12 100×2450×2890
Габаритные размеры с учетом присоединительных устройств, длина × ширина × высота, мм	12 192×2670×3894
Число ступеней очистки	Две
Масса брутто, не более, кг	14 000
Материал	Коррозионно-стойкая сталь
Температура отключения по перегреву, °С	50
Отключение при отсутствии потока воздуха через комплекс	Есть

Основные части комплекса:

- Блок-контейнер — размещение элементов, необходимых для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей, запахов сероводорода, аммиака, меркаптанов, а также других вредных и дурнопахнущих веществ.

- Ультрафиолетовый (УФ) модуль — размещение специальных УФ-ламп, имеющих в своем излучении длину волны 185 нм.
- Блок каталитической засыпки — размещение сорбционно-каталитической засыпки.
- Блок предварительной очистки воздуха — предварительная очистка воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц.
- Пульт управления комплексом и контроля технологических параметров его работы.
- Шкаф ЭПРА — размещение электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА), запускающих и регулирующих работу УФ-ламп; обработка и передача сигналов об исправности УФ-ламп, датчиков концентраций метана и сероводорода, датчиков давления и прочей информации на пульт управления, дистанционная передача данных о работе комплекса.
- Щит вводной — подключение силового питающего кабеля, ввод и вывод комплекса из работы, аварийное отключение питания комплекса.

Блок-контейнер *1* (рис. 1) разделен внутри герметичной перегородкой *15* на два отсека. В первом (проточная часть комплекса) происходит очистка обрабатываемого воздуха, во втором (машинное отделение) установлены емкость для промывки УФ-ламп *11*, вентилятор *12*, обеспечивающий прохождение через комплекс заданного проектом расхода воздуха, шкаф ЭПРА *14*.

На входе блок-контейнера установлен диффузор *4*, а на выходе — конфузор *5*, предназначенные для распределения и выравнивания потока воздуха на входе и выходе блок-контейнера соответственно.

Воздух поступает в блок-контейнер по воздуховоду через диффузор *4*, затем он проходит через блок предварительной очистки воздуха *21* от пыли, мелкодисперсных частиц и для снижения водяного аэрозоля.

Через выравнивающую решетку *18* для равномерного распределения потока обрабатываемого воздуха по поперечному сечению блок-контейнера воздух поступает на первую стадию очистки.

На первой стадии очистки воздух обрабатывается озоном и различными радикалами, образующимися в процессе работы специальных УФ-ламп, установленных в УФ-модуле *17*. Озон и радикалы окисляют вредные и дурнопахнущие вещества, содержащиеся в воздухе, в том числе аммиак, сероводород и меркаптаны. Окисление происходит в два этапа: первичное окисление — в объеме блок-контейнера между УФ-лампами и блоком каталитической

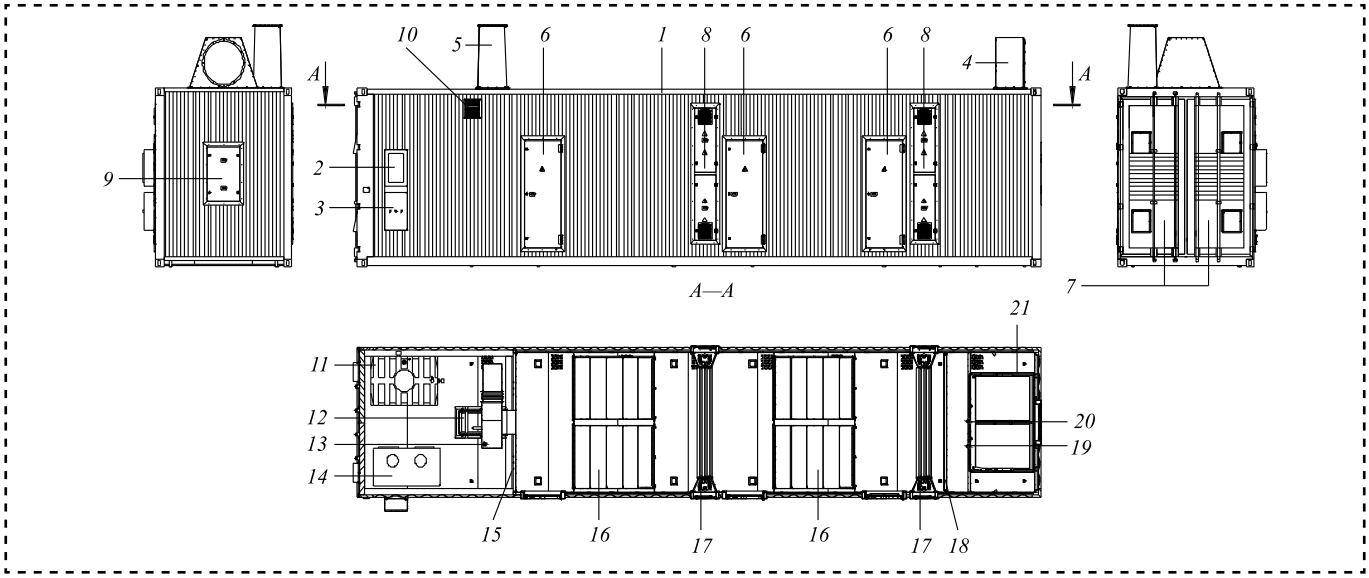

Рис. 1. Комплекс очистки воздуха от примесей:

1 — блок-контейнер; *2* — пульт управления; *3* — щит вводной; *4* — диффузор; *5* — конфузор; *6* — дверь обслуживания блок-контейнера; *7* — дверь обслуживания машинного отделения; *8* — люк обслуживания УФ-модуля; *9* — люк обслуживания блока предварительной очистки воздуха; *10* — вентилятор системы охлаждения шкафа ЭПРА; *11* — емкость для промывки УФ-ламп; *12* — вентилятор; *13* — датчик температуры; *14* — шкаф ЭПРА; *15* — перегородка; *16* — блок каталитической засыпки; *17* — УФ-модуль; *18* — выравнивающая решетка; *19* — датчик метана; *20* — датчик сероводорода; *21* — блок предварительной очистки воздуха

засыпки *16*; вторичное окисление — непосредственно на поверхности каталитической засыпки. Продукты реакций окисления — нейтральные соединения (соли неорганических кислот, углекислый газ и пары воды), оседающие в блоке калитической засыпки.

Пройдя через блок каталитической засыпки *16*, обрабатываемый воздух поступает на вторую стадию очистки, которая по технологии очистки повторяет первую стадию, и далее очищенный воздух через конфузор *5* поступает в атмосферу.

В блок-контейнере установлены датчики температуры *13* выбрасываемого в атмосферу обрабатываемого воздуха, метана *19* и сероводорода *20*. Для определения степени загрязнения фильтров и сеток каплеотделителя блока предварительной очистки воздуха, а также для определения снижения протока воздуха через весь комплекс, в шкафу ЭПРА установлены два дифманометра *4*.

Ламповые кабели, кабели датчиков и питания электродвигателя вентилятора проложены в лотках и герметично отделены от проточной части комплекса.

Комплекс оснащен системой автоматической промывки УФ-ламп. Вода поступает из емкости *11*, которую заполняют вручную в процессе технологического обслуживания по сигналам соответствующих датчиков.

Для обслуживания блок-контейнера и машинного отделения предусмотрены двери *6*, *7* и люки *8*, *9*. Все двери и люки обслуживания должны быть закрыты во время работы комплекса.

УФ-модуль (рис. 2) состоит из короба *1*, верхнего порожка *2* и поперечного кабель-канала *3*. В коробе установлено 24 УФ-лампы *4*, предназначенные для генерации окислителей (озона, радикалов OH^- и др.). УФ-лампы защищены от механического повреждения при их обслуживании с помощью горизонтально расположенных стальных труб *5* диаметром 30 мм. При необходимости (например, чтобы заменить или протереть УФ-лампы) трубки можно извлечь из УФ-модуля. Герметичность лампы обеспечивается уплотнительным кольцом. В верхней части лампового модуля установлена лейка *6* подачи воды для промывки ламп.

Для контроля температуры в УФ-модуле в верхней части лампового короба установлены два термостата *7*.

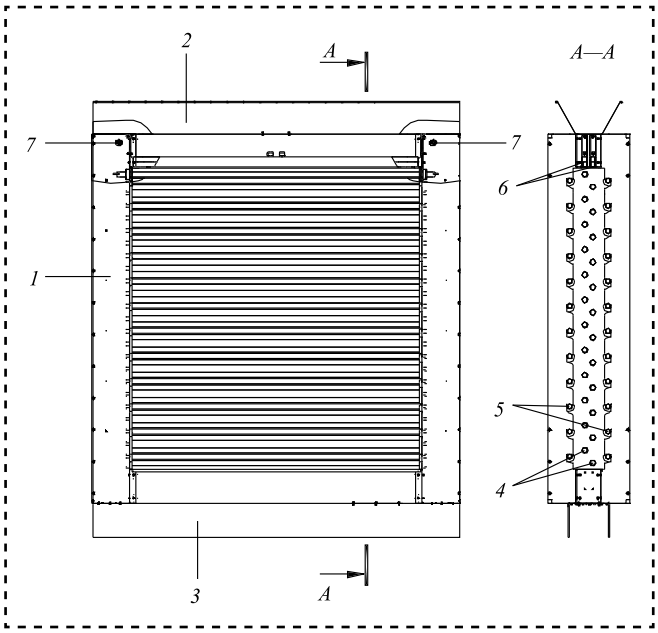

Рис. 2. УФ-модуль:
1 — короб ламповый; *2* — верхний порожек; *3* — поперечный кабель-канал; *4* — УФ-лампа; *5* — трубка; *6* — лейка; *7* — термостат

Блок каталитической засыпки (рис. 3) состоит из каркаса *1*, в котором установлены секции *2* с каталитической засыпкой.

Блок предварительной очистки воздуха (рис. 4) состоит из сеток каплеотделителя (класс фильтрации не ниже G3) *2* и фильтров G4/F5 *3*, закрепленных на каркасе *1* с помощью гаек *4*. Обрабатываемый воздух после диффузора проходит через сетки каплеотделителя *2*, затем через фильтр G4/F5 *3* и поступает на первую стадию очистки.

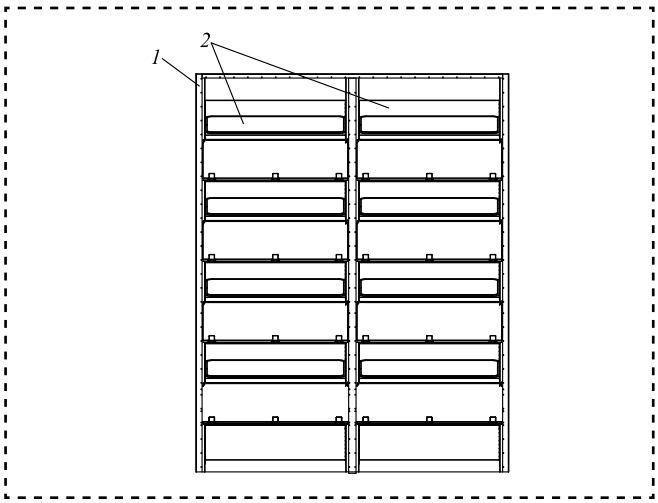

Рис. 3. Блок каталитической засыпки:
1 — каркас; *2* — секция

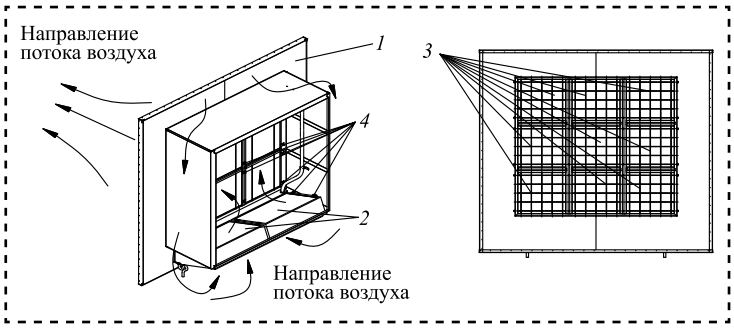

Рис. 4. Блок предварительной очистки воздуха:
1 — каркас; *2* — сетки каплеотделителя (фильтр G3); *3* — фильтр G4/F5; *4* — гайка-барашек

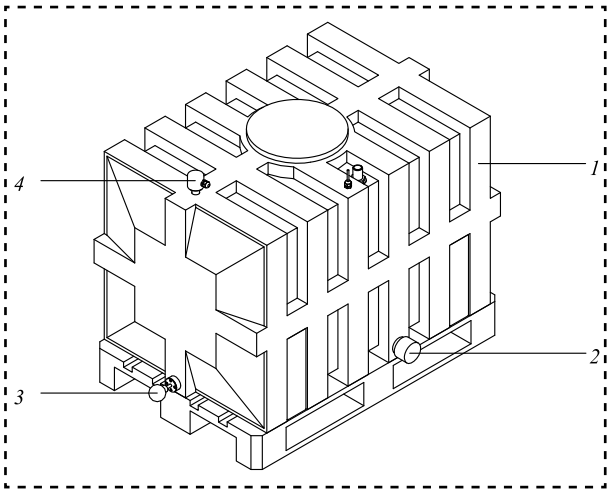

Рис. 5. Емкость для промывки УФ-ламп:
1 — емкость; *2* — ТЭН; *3* — датчик температуры; *4* — кондуктометрический датчик уровня

Внутри пластиковой емкости *1* для промывки УФ-ламп (рис. 5) установлен погружной насос. Нагрев воды осуществляется при помощи тэна *2*, установленного в нижней части емкости. Температуру воды в емкости контролирует датчик температуры *3*. Также в верхней части емкости установлен кондуктометрический датчик уровня *4* воды в емкости для формирования аварийного сигнала при низком уровне воды в емкости, сигнализирующем о необходимости срочного долива воды в емкость.

Технические характеристики
датчика уровня воды LNK-R (нормально замкнутый)

Рабочая температура, °С . . . . . –10...+125
Напряжение питания, В . . . . . 10...28

Пульт управления комплекса (рис. 6) состоит из корпуса *1*, на двери *2* которого располагается панель управления *3*. Внутри на монтажной панели *4* установлены термостат *6*, нагреватель *8*, автоматический выключатель *5* и блок клеммных зажимов *7*.

На панели управления расположены следующие элементы управления и сигнализации (рис. 7):

- лампа сигнальная "СЕТЬ" (зеленая) сигнализирует о подаче сетевого питания на пульт управления;

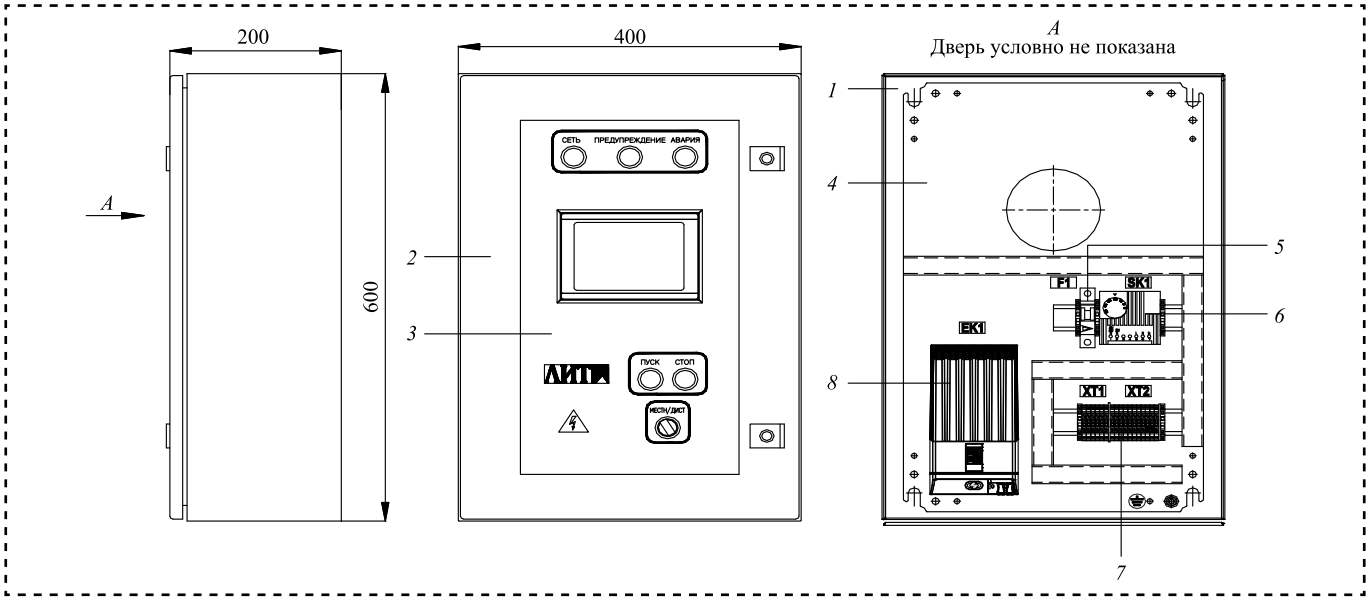

Рис. 6. Пульт управления:
1 — корпус; *2* — дверь; *3* — панель управления; *4* — монтажная панель; *5* — автоматический выключатель; *6* — термостат; *7* — блок клеммных зажимов; *8* — нагреватель

• лампа сигнальная "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ" (желтая) сигнализирует о том, что некоторые технологические параметры комплекса не соответствуют номинальным значениям, но комплекс функционирует в полном объеме;

• лампа сигнальная "АВАРИЯ" (красная) сигнализирует об аварийном состоянии комплекса;

• кнопка "ПУСК" для включения комплекса;

• кнопка "СТОП" для выключения комплекса;

• переключатель "МЕСТН./ДИСТ." (МЕСТНОЕ — ДИСТАНЦИОННОЕ) для выбора режима управления комплексом.

С помощью переключателя *7* "МЕСТН./ДИСТ." выбирают режим управления работой комплекса — местный или дистанционный. Переключатель "МЕСТН./ДИСТ." можно переводить из одного положения в другое при работающем комплексе.

Панель оператора *4* (см. рис. 7) служит для индикации состояния комплекса, настройки технологических параметров комплекса, управления отдельными компонентами комплекса.

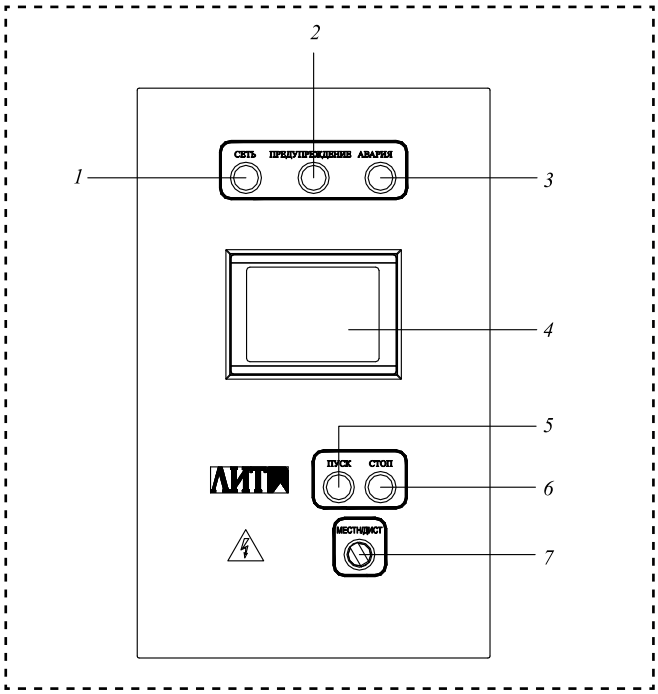

Рис. 7. Панель управления пульта управления:
1 — световой индикатор "СЕТЬ" (зеленый); *2* — световой индикатор "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ" (желтый); *3* — световой индикатор "АВАРИЯ" (красный); *4* — панель оператора; *5* — кнопка "ПУСК" для включения УФ-ламп; *6* — кнопка "СТОП" для выключения УФ-ламп; *7* — переключатель режимов управления "МЕСТН./ДИСТ."

В машинном отделении блок-контейнера размещен шкаф ЭПРА, состоящий из корпуса *1*, установленного на цоколе *4* (рис. 8).

Вентиляция шкафа ЭПРА осуществляется при помощи фильтров выходных *3*, установленных на дверях шкафа ЭПРА и внешнего вентилятора *10*, установленного в блок-контейнере. Для контроля температуры воздуха внутри шкафа установлены датчик температуры *6* и термостат *17*.

В шкафу ЭПРА размещены восемь групповых ЭПРА *10*, а также элементы управления и контроля работы УФ-ламп и силовой коммутации.

В нижней части шкафа ЭПРА находятся нагреватели *7*.

Подвод ламповых кабелей, кабелей датчиков осуществляется через кабельные вводы и гермовводы, установленные на задней панели цоколя *4*.

На боковой панели шкафа ЭПРА установлены розетка *8* для питания внешних устройств и разъем *9* для питания переносного светодиодного светильника, необходимого для обслуживания шкафа ЭПРА.

ЭПРА предназначен для включения и обеспечения нормальной работы шести УФ-ламп. ЭПРА обеспечивает предварительный прогрев электродов, поджиг и рабочий режим УФ-ламп. В корпус ЭПРА вставлены четыре платы и вентилятор. Одна плата питания (ИП), остальные — двухканальные ламповые платы (ДК). Ламповая плата осуществляет контроль работы двух УФ-ламп и на ней установлены два светодиода, которые могут индицировать длинный или короткий импульс. При выключенной лампе светодиод не светится. Если лампа работает нормально, то светодиод светится постоянно. В случае неисправности светодиод мигает. Последовательность импульсов светодиодов отражает состояние ЭПРА (этапы работы) или характеристику неисправности (код ошибки).

Если УФ-лампа не горит, то необходимо проверить и при необходимости заменить платы (ИП и/или ДК), входящие в состав ЭПРА, одновременно с проверкой и заменой соответствующей УФ-лампы.

В случае выхода из строя вентилятора ЭПРА его заменяют, в случае выхода из строя других элементов корпуса ЭПРА необходимо провести замену корпуса ЭПРА.

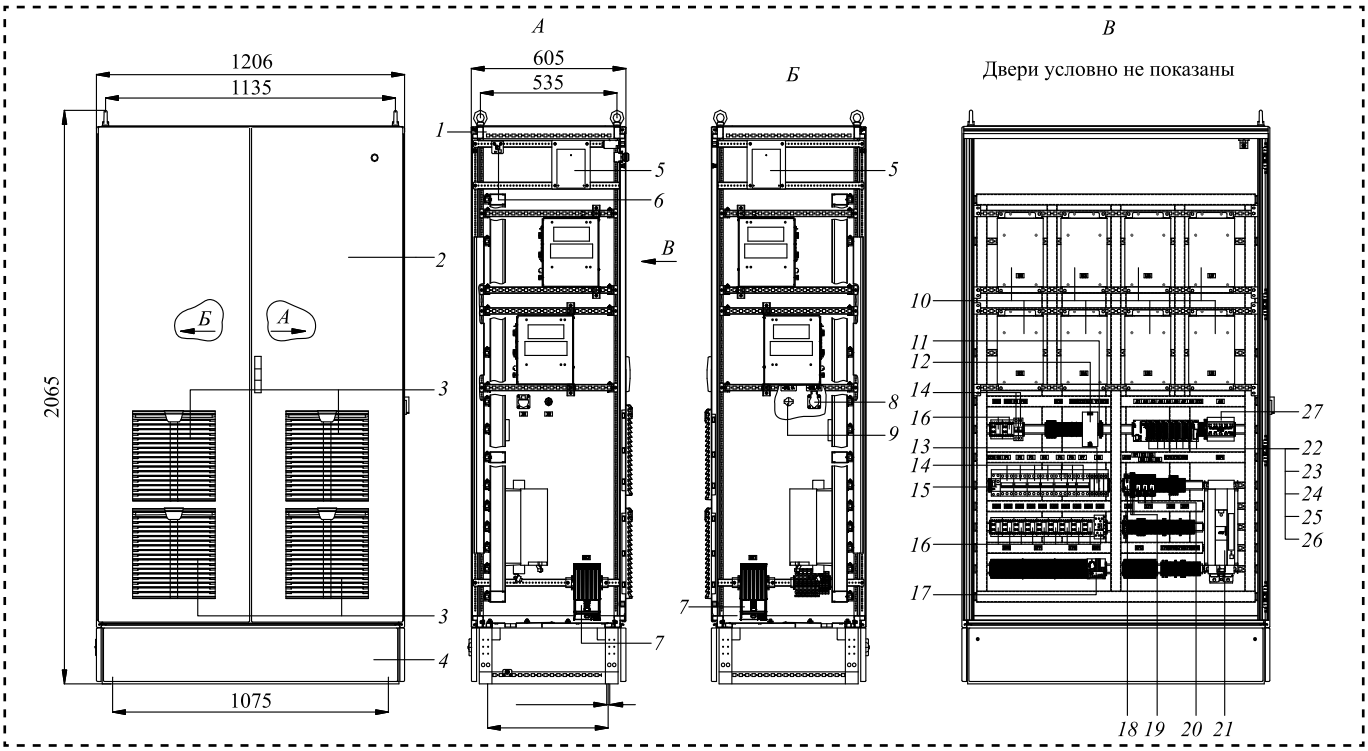

Рис. 8. Шкаф ЭПРА:

1 — корпус; *2* — дверь; *3* — фильтр выходной; *4* — цоколь; *5* — дифманометр; *6* — датчик температуры; *7* — нагреватель; *8* — розетка (~220 В, 16 А); *9* — разъем (24 В, 1 А); *10* — групповой ЭПРА; *11* — защита от перенапряжения; *12* — источник питания; *13* — ограничитель перенапряжения (класс С); *14* — автоматический выключатель; *15* — дифференциальный выключатель; *16* — контактор; *17* — термостат; *18* — реле контроля фаз; *19* — модуль релейного интерфейса; *20* — реле; *21* — частотный преобразователь; *22* — процессорный модуль; *23* — модуль дискретного вывода; *24* — модуль дискретного ввода; *25* — аналоговый модуль; *26* — коммуникационный процессор; *27* — контроллер управления мощностью ламп

Щит вводной состоит из корпуса *1*, на боковой панели которого установлен главный выключатель *5* для включения или выключения комплекса (рис. 9). На двери *6* щита вводного установлена лампа *7* зеленого цвета, сигнализирующая о подаче питания на комплекс. Внутри щита вводного установлена монтажная панель *2*, на которой размещены держатель-разъединитель плавкой вставки *3* и блок клеммных зажимов *4*.

В нижней части щита вводного размещен гермоввод *8* для подвода кабеля питания комплекса. Отвод кабелей осуществляется через кабельные вводы *9* на задней панели щита вводного.

Комплекс может работать в режимах местного и дистанционного управления и контроля.

К функциям пульта управления относят: контроль исправности каждой УФ-лампы и ЭПРА; подсчет времени наработки и числа включений УФ-ламп; включение/выключение УФ-ламп; аварийное отключение комплекса при перегреве шкафа ЭПРА или блок-контейнера; контроль наличия потока воздуха в блок-контейнере; управление работой двигателя вентилятора *12* с помощью частотного преобразователя *21*, установленного в шкафу ЭПРА; контроль концентрации сероводорода в потоке обрабатываемого воздуха; контроль концентрации метана в потоке обрабатываемого воздуха; контроль загрязнения фильтров G4/F5 *3* и сеток каплеотделителя *2*.

Режим работы комплекса, когда переключатель *7* находится в положении "МЕСТН.", позволяет контролировать состояние комплекса, настраивать технологические параметры работы комплекса, управлять отдельными компонентами комплекса с панели оператора пульта управления.

В случае отклонения работы комплекса от нормального режима, не влияющего на ход технологического процесса очистки воздуха, на передней панели пульта управления загорается световой индикатор "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ".

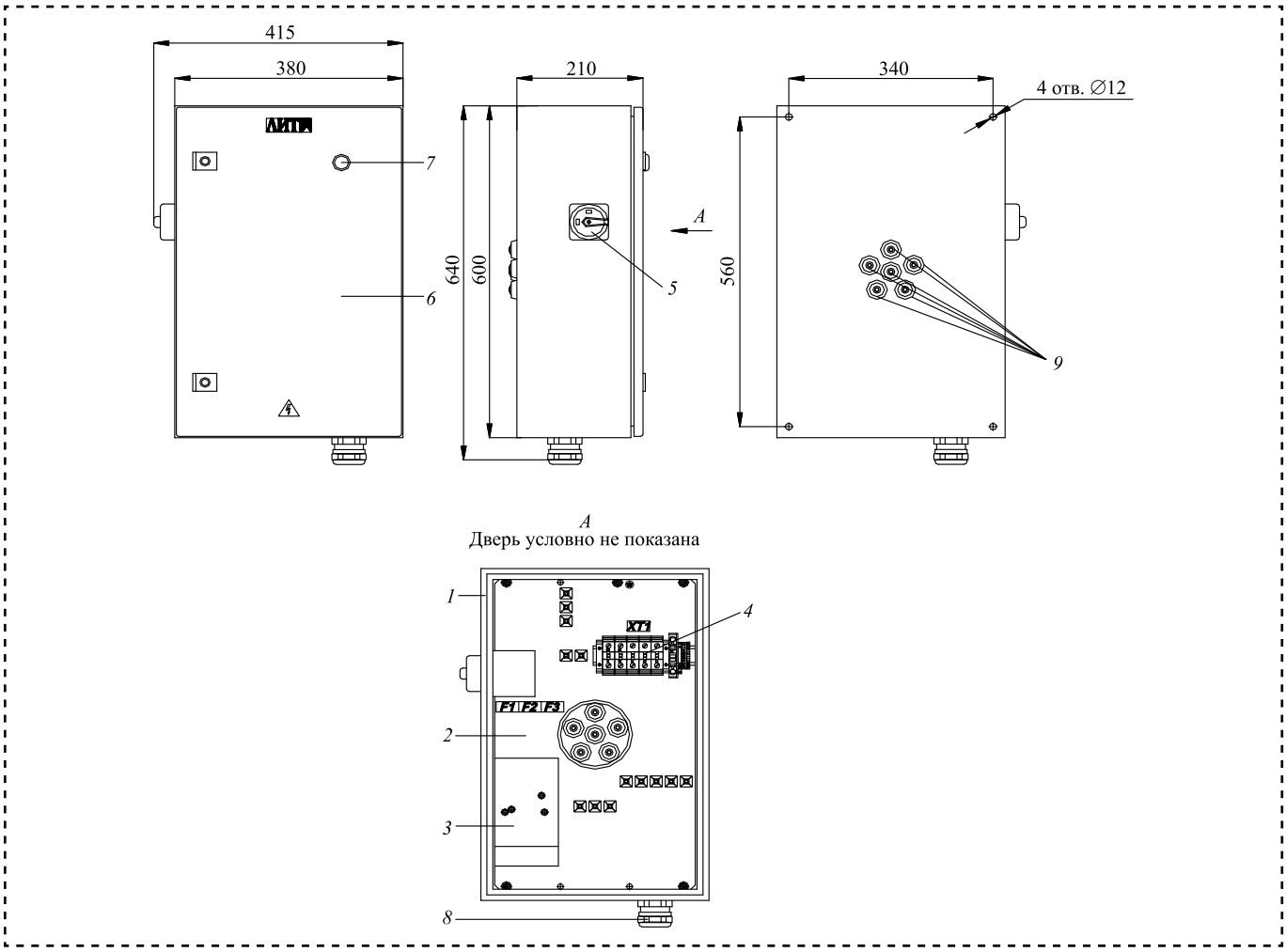

Рис. 9. Щит вводной:
1 — корпус; *2* — монтажная панель; *3* — держатель-разъединитель плавкой вставки; *4* — блок клеммных зажимов; *5* — главный выключатель; *6* — дверь; *7* — сигнальная лампа; *8* — гермоввод; *9* — кабельный ввод

Для получения информации о неисправности необходимо нажать соответствующую кнопку на панели оператора.

Отключение комплекса происходит через определенный промежуток времени после появления сигнала "АВАРИЯ". При этом на панели пульта управления продолжает гореть световой индикатор "АВАРИЯ", исполнительные элементы (УФ-лампы и вентилятор) выключаются. Для получения информации об аварийной ситуации необходимо нажать соответствующую кнопку на панели оператора.

В случае аварийного отключения необходимо устранить причины возникновения аварийной ситуации, провести сброс аварии нажатием кнопки "СТОП" и включение комплекса нажатием кнопки "ПУСК".

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания ультрафиолетовым излучением // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 11. С. 59—64.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302—307.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017.

4. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: МИРЭА. 2017.

5. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС. 2018. 135 с.

УДК 658.562

О.В. Чечуга, *канд. техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: sourie_1@mail.ru

Испытания и технический контроль

Рассмотрено применение новых разработанных на основе компетентностного подхода дополнительных профессиональных программ для методического обеспечения подготовки специалистов по испытаниям и техническому контролю. Проведен анализ требований профессиональных стандартов, федеральных государственных образовательных стандартов и национальных стандартов для повышения профессиональных компетенций.

The application of new professional programs developed on the basis of the competence approach for methodical support of training of specialists in testing and technical inspection is considered. The analysis of the requirements of professional standards, federal state educational standards and national standards to improve professional competencies.

Ключевые слова: технический контроль, испытания, стандарт, профессиональные компетенции, компетентностный подход.

Keywords: technical inspection, testing, standard, professional competence, competence approach.

Введение

Контроль — это определение соответствия установленным требованиям, а испытание — определение соответствия требованиям для конкретного предполагаемого использования или применения [1]. Определение соответствия — это действия по установлению одной или более характеристик и величин этих характеристик [1]:

— исследование, анализ и моделирование [1—4];

— мониторинг (определение статуса) на различных этапах, стадиях или сроках [1, 5, 6];

— измерение, для которого объективно возникает необходимость (совокупность операций для определения значения параметра с применением измерительного оборудования: средств измерений и программ испытаний [7], программных средств, эталонов, справочных материалов, вспомогательной аппаратуры или их различных комбинаций [1]);

— контроль и испытания.

Деятельность по испытаниям и техническому контролю существенно зависит от компетентности специалиста, его способности применять знания и навыки для достижения намеченных результатов. Ввиду перспективности и востребованности специалистов на российском и зарубежном рынках, многие производители и группы инженеров уже сегодня разрабатывают профессиональные стандарты в этой области [8].

Широкое внедрение информационных, автоматизированных и роботизированных технологий в различных отраслях предполагает развитие новых подходов в части испытаний и технического контроля определенных параметров, как производимой продукции, так и предоставляемых услуг, мониторинга их качества и сохранения заданных свойств на протяжении установленного срока [9, 10]. Во многих областях народного хозяйства, включая образование и промышленность, в настоящее время задействуются новейшие инновационные технологии, позволяющие объективно и оперативно устанавливать требуемые текущие характеристики и показатели качества продукции и/или услуг, а также их изменения во

времени [5, 6]. Для этого применяют не только специализированные приборы, но и визуальные методы, позволяющие максимально быстро ориентировать потребителя или пользователя по одной или нескольким важным для него характеристикам [11].

Эффективность проведения испытаний и применения технического контроля зависит от квалификации лица, выполняющего контроль, или ответственного за него.

Цель работы — выработать рекомендации по методическому обеспечению подготовки специалистов по испытаниям и техническому контролю для улучшения испытаний и технического контроля продукции.

Изучены и проанализированы требования:

— приказа Минпромторга № 1664 от 01.12.2011 г. "Об утверждении квалификационных требований к техническим экспертам";

— профессионального стандарта "Специалист по технологиям материалообрабатывающего производства" (утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от № 615н 08.09.2014 г.);

— приказа № 1000 от 11.08.2016 г. об утверждении ФГОС ВО по направлению подготовки 15.03.05 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств";

— ряда национальных стандартов.

В части проведения неразрушающего контроля большинство вопросов обеспечения испытаний и технического контроля регламентированы удовлетворительно. Например, персонал, выполняющий испытания и визуальный технический контроль в соответствии с требованиями документа [12], должен доказать, что он:

хорошо знаком с соответствующими стандартами, правилами, техническими условиями, оборудованием и процедурами/инструкциями;

хорошо знаком с соответствующей технологией производства и/или условиями эксплуатации изделия, подвергающегося контролю;

имеет зрение, удовлетворяющее требованиям ГОСТ Р 54795—2011 [13]. Дополнительно, при выполнении обзорного визуального контроля, миопия (близорукость), проверенная с помощью стандартного оптотипа, должна быть не хуже 0,63 хотя бы для одного глаза с коррекцией или без. Проверку зрения следует проводить не реже одного раза в 12 месяцев.

В части проведения испытаний и технического контроля общемашиностроительных изделий уровень регламентации существенно ниже. Поэтому проведена апробация разработанной на основе компетентностного подхода дополнительной профессиональной программы [8]. Минимальными входными требованиями установлено, что лица, желающие ее освоить, могут иметь среднее профессиональное и/или высшее образование, удостоверенное документом государственного образца, по одному из направлений подготовки (специальностей), входящих в укрупненные группы направлений подготовки и специальностей: "Проектирование технических и технологических комплексов"; "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств"; "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"; "Управление качеством"; "Метрология, стандартизация и сертификация", с присвоением квалификации "инженер" или специального звания "инженер", "бакалавр-инженер" или "магистр-инженер" или среднее профессиональное образование (СПО), удостоверенное документом государственного образца, по одной из специальностей, входящих в укрупненную группу направлений подготовки в области машиностроения.

Приветствовалось наличие опыта практической работы не менее двух лет, полученного при проведении технического контроля.

В результате освоения программы слушатель приобретает знания, умения и владения, необходимые для качественного проведения испытаний и технического контроля.

Необходимые знания:

— технические требования, предъявляемые к изготавливаемым изделиям;

— основные методы и способы контроля технических требований;

— основные средства контроля технических требований;

— виды брака в изготовлении изделий;

— правила эксплуатации технологической оснастки;

— технологические факторы, вызывающие погрешности изготовления изделий;

— стандарты и другие нормативные материалы по технологичности;

— правила и принципы выбора средств измерений, используемых в контрольной оснастке;

— методы уменьшения влияния технологических факторов, вызывающих погрешности изготовления изделия.

Необходимые умения:

— анализировать схемы контроля технических требований;

— анализировать производственную ситуацию и выявлять причины брака в изготовлении изделий;

— выбирать средства измерения, используемые в контрольной оснастке;

— согласовывать внесение изменений в технологические процессы и технологическую документацию;

— анализировать предложения по предупреждению и ликвидации брака и изменениям в технологических процессах.

Необходимые владения:

— навыками анализа технических требований, предъявляемых к изделию;

— навыками выбора схемы контроля технологических требований, предъявляемых к изделию;

— умением осуществлять выбор средств контроля технологических требований, предъявляемых к изделию;

— умением проводить контроль по предупреждению и ликвидации брака и изменений в технологических процессах.

Приобретенные в результате освоения программы слушателем знания и умения сведены в табл. 1.

При реализации программы повышения квалификации для разных категорий слу-

Таблица 1

Результаты обучения в зависимости от начальной подготовки слушателей

Результаты обучения	Базовый уровень образования слушателей		Слушатели, получающие ВО
	ВО	СПО	
Знания			
Технические требования, предъявляемые к изготавливаемым изделиям	*	*	*
Основные методы и способы контроля технических требований	*	*	*
Основные средства контроля технических требований	*	*	*
Виды брака в изготовлении изделий	*	*	*
Правила эксплуатации технологической оснастки	*	—	*
Технологические факторы, вызывающие погрешности изготовления изделий	*	*	*
Стандарты и другие нормативные материалы по технологичности	*	*	*
Правила и принципы выбора средств измерений, используемых в контрольной оснастке	*	—	*
Методы уменьшения влияния технологических факторов, вызывающих погрешности изготовления изделия	*	—	*
Умения			
Анализировать схемы контроля технических требований	*	*	*
Анализировать производственную ситуацию и выявлять причины брака в изготовлении изделий	*	—	*
Выбирать средства измерения, используемые в контрольной оснастке	—	—	*
Согласовывать внесение изменений в технологические процессы	—	—	*
Согласовывать внесение изменений в технологическую документацию	—	—	*
Анализировать предложения по предупреждению и ликвидации брака и изменениям в технологических процессах	—	—	*

шателей выявлено, что ее построение по модульному принципу более результативно. Под модулем понимается часть образовательной программы, имеющая логическую завершенность по отношению к установленным целям и результатам обучения. Модульный принцип позволил реализовать свой набор модулей для каждой категории слушателей.

Например, в рабочей программе курса повышения квалификации "Специалист по контролю и управлению технологическими процессами изготовления изделий машиностроения" восемь модулей.

Модуль 1. Введение.

Модуль 2. Стандарты, технические условия и другие нормативные документы (4 ч):

Тема 2.1. Государственный метрологический контроль и надзор (2 ч).

Цели проведения государственного контроля и надзора. Процесс проведения государственного контроля и надзора. Права государственного инспектора. Организация работы ОТК на предприятии.

Тема 2.2. Межотраслевые системы (комплексы) стандартов (2 ч).

Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Единая система технологической документации (ЕСТД). Комплексы стандартов по безопасности жизнедеятельности. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Межгосударственная система стандартизации (МГСС).

Модуль 3. Технические требования, предъявляемые к машиностроительной продукции (7 ч):

Тема 3.1. Взаимозаменяемость гладких цилиндрических деталей (4 ч).

Обозначение полей допусков, предельных отклонений и посадок на чертежах. Неуказанные предельные отклонения размеров. Посадки с зазором. Переходные посадки. Посадки с натягом.

Тема 3.2. Шероховатость поверхности (1 ч).

Параметры шероховатости. Обозначение шероховатости на чертежах.

Тема 3.3. Система допусков и посадок (1 ч).

Общие термины и определения. Отклонения и допуски формы. Отклонения и допуски расположения. Суммарные отклонения и допуски формы и расположения поверхностей. Зависимый и независимый допуски формы и расположения. Обозначение на чертежах допусков формы и расположения. Неуказанные допуски формы и расположения.

Тема 3.4. Волнистость поверхности (1 ч).

Практическое занятие по теме: "Определение требований к форме, расположению и шероховатости поверхностей" (3 ч) с разбором конкретных ситуаций и групповой дискуссией.

Модуль 4. Методы определения соответствия выпускаемой продукции требованиям регламентирующей документации (8 ч):

Тема 4.1. Объекты и методы измерений, виды контроля (2 ч).

Измеряемые величины. Международная система единиц физических величин. Виды и методы измерений. Виды контроля. Методика выполнения измерений. Технический контроль.

Тема 4.2. Средства измерений (2 ч).

Виды средств измерений. Измерительные сигналы. Метрологические показатели средств измерений. Метрологические характеристики средств измерений. Классы точности средств измерений. Метрологическая надежность средств измерений. Метрологическая аттестация средств измерений.

Тема 4.3. Альтернативный метод контроля изделий (1 ч).

Калибры для гладких цилиндрических деталей. Контроль размеров высоты и глубины. Контроль конусов и углов.

Тема 4.4. Измерения формы и расположения поверхностей (1 ч).

Тема 4.5. Контроль и измерение шероховатости (1 ч).

Тема 4.6. Контроль и измерение резьбы (1 ч).

Контроль резьбы калибрами. Дифференцированный (поэлементный) контроль параметров резьбы.

Практические занятия по темам (табл. 2).

Таблица 2

Перечень практических (семинарских) занятий к модулю 4

Номер темы	Наименование практического (семинарского) занятия
4.3	Контроль параметров гладких цилиндрических деталей (1 ч). Разбор конкретных ситуаций (метод кейс-стади). Групповая дискуссия
4.4	Контроль отклонений формы изделия (1 ч)
4.5	Контроль шероховатости обработанной поверхности (1 ч)
4.6	Контроль резьбы (1 ч)

Модуль 5. Основные методы выявления и предупреждения производственного брака (4 ч):

Тема 5.1. Виды производственного брака и методы его предупреждения (1 ч).

Брак исправимый и неисправимый. Условие годности.

Тема 5.2. Правила проведения испытаний и приемки продукции машиностроения (1 ч).

Тема 5.3. ГОСТ 15.309—98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции (2 ч).

Модуль 6. Государственная аттестация качества продукции (2 ч):

Тема 6.1. Методы отраслевой и заводской аттестации качества продукции (2 ч).

Модуль 7. Пооперационный контроль в машиностроении (4 ч):

Тема 7.1. Основные положения и понятия технологии машиностроения (2 ч).

Производственный и технологический процессы в машиностроении. Объекты производства. Характеристики производственного и технологического процессов. Типы производства. Элементы технологической операции. Виды технологических процессов и способы их описания. Определение основного времени.

Тема 7.2. Теория базирования (2 ч).

Основные термины и определения. Правило шести точек. Виды баз. Взаимосвязь конструкторских и технологических размеров. Цепной, координатный и комбинированный методы достижения точности относительного расположения поверхностей. Выбор черновых баз. Общие рекомендации по выбору технологических баз. Погрешности базирования. Анализ базирования с учетом действия направленных зажимов. Влияние деформаций контактных слоев на погрешность закрепления. Центрирование изделий.

Практические занятия по темам (табл. 3).

Таблица 3

Перечень практических (семинарских) занятий к модулю 7

Номер темы	Наименование практического (семинарского) занятия
7.1	Анализ установок заготовок в приспособлениях (2 ч). Разбор конкретных ситуаций (метод кейс-стади). Групповая дискуссия
7.2	Методы и средства измерения размеров деталей (2 ч). Разбор конкретных ситуаций (метод кейс-стади). Групповая дискуссия

Модуль 8. Разработка технологических процессов с точками контроля (8 ч):

Тема 8.1. Разработка технологических процессов сборки (4 ч).

Основные положения. Исходные данные для разработки технологических процессов. Общие положения разработки технологических процессов.

Тема 8.2. Разработка технологических процессов изготовления деталей машин (4 ч).

Исходные данные и этапы разработки технологических процессов. Анализ технических требований чертежа, выявление технологических задач и условий изготовления детали. Определение типа производства и метода работы. Технологичность конструкций деталей машин. Технологический контроль конструкторской документации. Составление маршрута технологического процесса.

Практические занятия по темам (табл. 4).

Таблица 4

Перечень практических (семинарских) занятий к модулю 8

Номер темы	Наименование практического (семинарского) занятия
8.2	Оформление операционных карт операций обработки резанием (2 ч). Разбор конкретных ситуаций (метод кейс-стади). Групповая дискуссия
8.2	Оформление операционных карт контроля (2 ч). Разбор конкретных ситуаций (метод кейс-стади). Групповая дискуссия

Заключение

В результате реализации разработанных на основе компетентностного подхода программ [8], построенных по модульному принципу, достигнуто качественное изменение следующих профессиональных компетенций, необходимых для выполнения профессиональной деятельности в рамках имеющейся квалификации:

— более результативное освоение и применение современных методов организации и управления качеством на машиностроительных предприятиях [14] за счет рационального выполнения работ по доводке и освоению технологических процессов, средств и систем технологического оснащения и контроля [15];

— более широкое применение современных методов по стандартизации и метрологиче-

скому обеспечению технологических процессов [16, 17], средств и систем технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления выпускаемой продукции за счет строгого соблюдения регламентов при выполнении работ по оценке соответствия выпускаемой продукции требованиям нормативной документации.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р ИСО 9000—2015.** Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 53 с.
2. **Dynamic** modeling of the behavior of permalloy for magnetic shielding / Z. Sun, L. Li, A. Schnabel et al. // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119. № 19. P. 193902.
3. **Маликов А.А., Ямникова О.А., Чечуга О.В.** Моделирование влияния характеристик поверхностного слоя на контактную жесткость стыков деталей машин // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. № 8—1. С. 282—293.
4. **Митин О.Н., Нуждин Г.А., Нгуен К.Х.** Моделирование операции обжима с утонением толстостенных трубных заготовок // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. № 5. С. 57—65.
5. **Remote** monitoring systems for quality management metal pouring / V.F. Minakov, T.E. Minakova // Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2015. Vol. 22. P. 63—71.
6. **Анисимова М.А., Казеева Ю.Н., Павеле Л.А., Нуждин Г.А.** Мониторинг образовательной деятельности методом структурирования функции качества // Контроль. Диагностика. 2010. № 6. С. 46—49.
7. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Разработка программы испытаний при подготовке к утверждению типа средства измерения // Справочник. Инженерный журнал. 2012. № 12. С. 26—28.
8. **Маликов А.А., Чечуга О.В.** Компетентностный подход при подготовке специалистов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. № 8—2. С. 300—308.
9. **Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Чечуга О.В.** К вопросу о возможности использования автоматизированных и роботизированных технологий в едином российском страховом фонде документации // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. № 12—1. С. 197—203.
10. **Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Чечуга О.В.** Обеспечение безопасности при хранении и транспортировке документации страхового фонда // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. № 12—1. С. 204—209.
11. **Advanced** optical monitoring system using a new developed low noise wideband spectrometer system / A. Zoller, D. Arhilger, M. Boos, H. Hagedorn // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, Advances in Optical Thin Films V. 2015. P. 962712.
12. **ГОСТ Р ЕН 13018—2014.** Контроль визуальный. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2015. 6 с.
13. **ГОСТ Р 54795—2011.** Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала. Основные требования. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
14. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А., Введенский В.Ю.** Контроль качества и рисков в производстве оборудования неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 50—54.
15. **Маликов А.А., Маркова Е.В., Чечуга О.В.** Применение метода микроиндентирования для определения механических характеристик поверхностного слоя // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2017. № 2 (57). С. 24—28.
16. **ГОСТ Р 8.820—2013.** ГСОЕИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
17. **Трегубов В.И., Благовещенский Д.И., Нуждин Г.А., Ларина М.В.** Метрологический мониторинг изделий, получаемых ротационной вытяжкой // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. № 1. С. 193—200.

УДК 168.501

Е.М. Попова, В.Л. Попов, *д-р физ.-мат. наук*
(Берлинский технический университет, Германия)
E-mail: elena.popova@tu-berlin.de, v.popov@tu-berlin.de

Роль аналогий и экзаптации в истории науки: от электростатики и теории гравитации к теории упругости, механике контактных взаимодействий и теории адгезии

Великие открытия зачастую воспринимаются последующими поколениями как неожиданные прозрения гениальных ученых. Однако реальным механизмом создания новых теорий и парадигм часто является перенос знаний из одной области исследований в другую. Часто он ведет к прорыву и быстрому развитию соответствующих областей знаний. Прослежен такой перенос знаний в истории теории упругости и механики контактных взаимодействий с одной стороны и электростатики с другой. Перенос знания как эффективного инструмента развития науки лежит в основе "метода аналогий". Принцип экзаптации (использование свойства для функции, для которой оно не было создано) в настоящее время — признанная теория механизма возникновения качественных изменений также и в биологической эволюции.

Great opening are often perceived by the subsequent generations as unexpected enlightenments of ingenious scientists. However the real mechanism of creation of new theories and paradigms often is transfer of knowledge from one area of researches in another. Often it leads to the breakthrough and rapid development of relevant areas of knowledge. This transfer of knowledge in the history of the theory of elasticity and the mechanics of contact interactions on one side and electrostatics on the other is traced. Transfer of knowledge as effective instrument of development of science is the cornerstone of "a method of analogies". The principle of exaptation (the use of a property for a function for which it was not created) is the currently recognized theory of the mechanism for the appearance of qualitative changes also in biological evolution.

Ключевые слова: контакт, электростатика, гравитация, теория потенциала, упругость, трещина, адгезия, метод граничных элементов.

Keywords: contact, electrostatics, gravitation, potential theory, elasticity, crack, adhesion, boundary element method.

Введение

Опубликованные научные работы или описания научных исследований редко воспроизводят действительный ход мысли и настоящую последовательность открытий. Джеральд Холтон отмечает: "Многие из этих публикаций являются реконструкциями, которые симулируют постепенное развитие с помощью простых взаимосвязей между экспериментом, теорией и традиционными понятиями" [1]. Поэтому интересно проследить, что говорят исторические исследования о реальном механизме открытий. М.А. Розов отмечает, что перенос знаний из одной области исследований в другую часто приводит к "внезапному" прорыву в этой области без видимой предшествующей разработки [2]. Он иллюстрирует этот механизм на многих исторических примерах. Один из самых знаменитых — Шарль Огюстен де Кулон. Кулон был успешным военным инженером. Его первая научная работа — мемуар 1773 г. "О применении правил максимума и минимума к некоторым статическим проблемам, относящимся к архитектуре" [3—5]. Эта работа посвящена двум основным областям его исследований: трению и сопротивлению материалов. Последующие работы до 1785 г. были посвящены развитию этих двух направлений. В 1784 г. Кулон публикует мемуары "Теоретическое и экспериментальное исследование кручения и упругости металлических нитей", но уже в 1985 г. он "вдруг" посвящает себя изучению электростатики, магнетизма и вязких сил в жидкостях [6, 7]. Для этих исследований Кулон использовал свои знаменитые крутильные весы, описанные во

Шарль Огюстен де Кулон с крутильными весами (автор Ипполит Лекомт)

всех учебниках по физике в связи с открытым им законом взаимодействия точечных зарядов. М.А. Розов объясняет эту смену исследовательского интереса тем, что в результате изучения законов кручения нитей Кулон создал уникальный инструмент для измерения сил. Позднее он только "переосмыслил" свое устройство не как средство изучения упругих свойств нитей, а как прибор для измерения сил, включая электрические. Один из самых знаменитых портретов Кулона изображает его вместе с крутильными весами (рисунок). Этот портрет может рассматриваться как символ его деятельности, поскольку он изображает предмет, объединяющий оба направления его научных исследований: механику материалов и теорию электричества. Эти две линии его научных интересов продолжали интенсивно взаимодействовать и взаимно оплодотворять друг друга и после смерти Кулона.

Физические основы аналогии между гравитацией, электричеством и упругостью

Физической предпосылкой для взаимного переноса открытий в области теории упругости и электростатики, продолжавшегося два столетия, является общность фундаментальных решениий в теории упругости и в теории точечного заряда в электростатике (или в теории гравитации). Концентрированная нормальная сила F_N, действующая на упругое полупространтсво в начале координат, вызывает нормальное смещение [8]:

$$u_z = \frac{1}{\pi E^*}\frac{F_N}{r}; \qquad E^* = E\big/\left(1-\nu^2\right), \tag{1}$$

где E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона.

Электрический потенциал, созданный точечным зарядом Q на расстоянии r от заряда [9]

$$\varphi = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r}, \tag{2}$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума).

Гравитационный потенциал точечной массы M:

$$\Phi(r) = -G\frac{M}{r}. \tag{3}$$

Явная схожесть уравнений (1)—(3) и есть физическая основа для общности многих проблем в электростатике, гравитации и теории упругости (и механике контактных взаимодействий).

Как открытый Кулоном закон стал "Законом Кулона"

Кулон опубликовал свои исследования в области электростатики и магнетизма в 1785—1789 гг. [10]. Эти работы не имели заметного влияния на развитие теории электростатики до тех пор, пока Пуассон не использовал закон Кулона для решения проблемы распределения заряда в системе проводников. Пуассон был учеником Лапласа и Лагранжа. Он окончил Политехническую школу в Париже и получил, как и Кулон, инженерное образование. В 1802 г. он стал профессором Политехнической школы. С 1808 г. работал в качестве астронома в бюро долгот. В 1809 г., став профессором рациональной механики только что основанного Факультета наук в Париже (Faculté des Sciences) и занимаясь проблемами небесной механики, представил в Академию наук три важных мемуара о нерегулярности планетарного движения. Пуассон развил теорию потенциала (созданную главным образом Лапласом) и показал, что уравнение Лапласа справедливо только в свободном от масс пространстве, обобщил уравнение Лапласа на общий случай произвольного распределения масс, таким образом сформулировав уравнение Пуассона. В 1811 г. Пуассон опубликовал несколько книг по механике и первую часть мемуара под названием "О распределении электричества на

поверхности проводящих тел" [11, 12]. В последующие годы он работал параллельно над проблемами потенциала распределенных масс и зарядов. Причина такого "изменения сферы исследований" очевидна: математическая эквивалентность электростатических и гравитационных сил сделала возможным перенос в область электростатики методов теории потенциала, которая развивалась со времен Ньютона в теории гравитации. Можно было бы сказать, что Пуассон не сделал "ничего нового" в теории электростатики: он только применил уже существовавшие методы, разработанные в теории гравитации, к сходным проблемам в электростатике. Однако это "только" стало часом рождения современной электростатики. Именно замеченная Пуассоном аналогия между законом обратных квадратов для гравитационных и электрических сил привела к тому, что открытая Кулоном зависимость стала "законом Кулона" и основой для последующего развития всей электродинамики.

В 1811—1815 гг. Пуассон работал над проблемами упругости мембран. Эта задача математически также эквивалентна соответствующим задачам в гравитации и электростатике.

Генрих Герц — основатель механики контактных взаимодействий

По всей видимости, Пуассон не обладал аналитическим решением задачи о потенциале поверхности заряженного эллипсоида. Вероятнее всего, эта задача впервые была решена Праной в 1840 г. [13]. Результат Праны был позднее использован Герцем в его знаменитом решении задачи о контакте двух упругих тел с искривленными поверхностями [14]. Современные формулировки механики контактного взаимодействия основаны на решении задачи о точечной силе, действующей на упругое полупространство, полученном Буссинеском и опубликованном спустя три года после решения Герца [15]. В своей знаменитой работе, с которой берет начало механика контактного взаимодействия, Герц исходит из аналогии контактной задачи и задачи о потенциале заряженного эллипсоида, исходя непосредственнно из уравнений теории упругости. Так как решение (1) в это время еще не было известно, то Герц не мог воспользоваться аналогией, определяемой уравнениями (1) и (2). Отметив найденную им аналогию, Герц использовал известное решение задачи о потенциале заряженного эллипсоида и тем самым получил решение контактной задачи. Решение контактной задачи в учебнике Ландау и Лифшица точно следует логике оригинальной работы Герца с единственным отличием: аналогия с электростатической проблемой обосновывается решением Буссинеска (1). Таким образом, главная заслуга Герца состояла в том, что он заметил сходство между упругими и электростатическими задачами и перенес существующее решение из теории электростатического потенциала в область упругости. Эта аналогия сделала Герца, который известен прежде всего своими основополагающими работами в области электродинамики, "неожиданно" основоположником механики контактных взаимодействий.

Электростатика и теория разрушения: Инглис и Гриффитс

Герц использовал решение задачи о потенциале заряженного эллипсоида для решения контактной задачи. Это решение тесно связано с проблемой распределения напряжений в среде с эллиптической полостью. В отличие от случая контактной задачи Герца, в этом случае аналогия не полная, но метод, использованный для решения электростатической задачи, может быть легко трансформирован для решения соответствующей задачи теории упругости. Задача о распределении напряжений в нагруженной среде с эллиптической полостью была решена С.Е. Инглисом в 1913 г. [16]. Хотя он не упоминает решений из области электростатики, его подход и обозначения все же однозначно напоминают способ решения задач из области электростатики. В частности, Инглис использует эллиптические координаты, которые были разработаны в связи с решением задачи о заряженном эллипсоиде. В случае сплюснутого эллипсоида с очень малой полуосью в нормальном направлении к двум другим это решение описывает эллиптическую "трещину" в упругом континууме. В знаменитой работе по теории трещин 1921 г. [17] А.А. Гриффитс использовал решение Инглиса, дополнив его его идеей баланса упругой энергии, накопленной в напряженном континууме и работой разрыва. Согласно Гриффитсу, вершина трещины находится в равновесии, если упругая энергия, которая релаксирует при распространении трещины на небольшое расстояние, равна работе разрыва поверхностей. Эта идея и стала основным вкладом Гриффитса. Вся математическая основа, необходимая для реализации этой идеи, была уже создана Инглисом.

Адгезионный контакт и трещина: от Гриффитса к Джонсону, Кендаллу и Робертсу

В 1971 г., спустя почти столетие после решения Герцом контактной задачи без адгезии, Джонсон, Кендал и Робертс (Johnson, Kendall &

Robers — JKR) опубликовали свою знаменитую статью об адгезии упругих тел параболической формы [18]. В этой работе JKR отмечают, что их подход аналогичен подходу Гриффитса: "...подход, использованный в этом анализе, аналогичен методу, использованному Гриффитсом для случая распространения хрупкой трещины". Интересно, что классики науки при этом не посчитали нужным сослаться на статью Гриффтса, а только упоминают его имя в тексте. Центральная идея статьи JKR состоит фактически в понимании того факта, что адгезионный контакт представляет собой инвертированную трещину Гриффитса (с единственной разницей, что в трещине разрыв обычно находится внутри, а в "адгезионном контакте" — снаружи). Затем JKR применили принцип энергетического баланса точно так, как это делал Гриффитс. Единственное отличие состоит в выражениях для упругой энергии. Гриффитс использует энергию "внутренней трещины", полученную Инглисом, а JKR — выражения, предложенные Герцем и Буссинеском. Осознание эквивалентности проблемы адгезионного контакта проблеме трещины Гриффитса и было важным вкладом JKR. Эта идея привела к быстрому переносу (как самими JKR, так и другими исследователями) методов и решений, разработанных в области механики разрушения, начиная с Гриффитса, в теорию адгезионных контактов [19].

Фактически Гриффитс имел все составляющие для решения задачи об адгезионном контакте. Если бы ему было необходимо решать задачу об адгезионном контакте, он, возможно, получил бы "JKR"-решение уже в 1921 г. Порой поражаешься, сколько времени требуется, чтобы увидеть схожесть проблем. Недаром еще Гете утверждал [20]:

"Что на свете всего труднее?
Видеть то, что лежит перед глазами."

Метод граничных элементов

Основные усилия математиков XVIII—XIX веков были направлены на поиск аналитических методов решения уравнений в частных производных, описывающие многие физические процессы. Ситуация изменилась в шестидесятые годы XX столетия с развитием компьютеров. Многие методы численного расчета основаны на дискретизации самих дифференциальных уравнений. К этой категории относится популярный метод конечных элементов (МКЭ). В МКЭ весь объем системы должен быть дискретизирован, а генерация расчетной сетки относится к наиболее трудоемким частям программной задачи. Другой вид численных методов использует фундаментальное решение (1) (и аналогичные решения для любой конкретной системы) и, таким образом, позволяет избежать дискретизации объема. Дискретизируется только граница моделируемой области — отсюда название: метод граничных элементов (МГЭ). МГЭ с математической точки зрения можно рассматривать как непосредственное продолжение контактной механики и механики разрушения в область численных методов. Трудно точно установить время рождения МГЭ. Но введен этот термин Крузом, Риццо и Бреббиа в начале 1970-х гг. почти одновременно с решением JKR [21]. В сущности, в 1971 г. все части формулировки МГЭ для адгезионной задачи уже существовали и были опубликованы. Но потребовалось еще 44 года, чтобы применить идеи, аналогичные идеям Гриффитса-JKR к адгезионным контактам. Первая формулировка "адгезионного МГЭ" предложена в 2015 г. Портом и Поповым, а формулировка на основе энергетического баланса — в 2017 г. [22—24]. Дальнейшее развитие происходило очень быстро [25]. В данное время метод является признанным методом численного моделирования адгезионных контактов со сложными конфигурациями [26, 27].

Кельвин и Максвелл — основатели метода аналогий в науке?

Думается, что в основе переноса знаний из одной области знаний в другую лежит механизм физической аналогии, умение видеть "подобное" в несхожих явлениях природы [28]. Историки науки называют XIX век веком обобщений в истории развития физики. Так, например, в эссе "Физика в 19-м столетии" Роберт Пуррингтон пишет, что "унификация выросла из понимания того, что многие фундаментальные проблемы физики (...) могут быть сформулированы в простых математических терминах. Это открытие дало в руки таких ученых, как Вильям Томсон и Джеймс Кларк Максвелл, мощный инструмент, который позволил им (а также другим) применить результаты теории тепла и газов к электромагнетизму, что, с одной стороны, размывало границы между столь различными научными областями, а с другой — расширяло горизонты физики" [29].

Яркий пример сознательного поиска и использования метода физических аналогий — работы Томсона и Максвелла в области электромагнетизма и теории поля. Еще студентом Томсон опубликовал ряд работ по применению метода рядов Фурье к задачам о распространении тепла в средах, обратив, в частности, вни-

мание на аналогии между законами распространения тепла и электрического тока. Читая работы Фарадея, он также обратил внимание на то, что результаты Фарадея по электростатической индукции могут быть использованы в теории упругих тел [29]. Заголовки его работ сороковых годов говорят сами за себя, как например, "О механическом представлении электрических, магнитных и гальванических сил" (1847 г.). В это время Томсон активно сотрудничал со Стоксом, который занимался в основном проблемами гидродинамики и упругости. Томсон использовал математические результаты Стокса в исследованиях по теории тепла и электромагнетизма. "Его целью, — пишет Пуррингтон, — было создание комплексной обобщающей динамической теории, и путь к этой теории лежал в явной схожести математических структур теорий тепла, электричества, магнетизма, света и упругих свойств твердых тел". Используя метод аналогий, Томсон пришел к выводу о единой природе распространения электрических, магнитных сил и волн в упругих твердых телах. Максвелл, находившийся под большим влиянием Томсона, назвал его методом "физической аналогии".

Максвелл был не только замечательным ученым, но и не менее замечательным философом науки. По замечанию Джозефа Тернера, опубликовавшего в 1955 г. статью "Максвелл о методе физической аналогии", Максвелла интересовали как общие философские проблемы, так и специальные проблемы, связанные с его собственным вкладом в физику, к их числу относится и метод физических аналогий [30]. Максвелл не написал специального труда по философии науки, но его идеи научного познания пронизывают его научные, биографические труды, письма... Например, он объясняет, что он понимает под "физической аналогией" в статье "О силовых линиях Фарадея" (1855 г.).

В "Обращении к математическому и физическому отделениям Британского научного общества" 15 сентября 1870 г. Максвелл рассуждает не только о природе физической аналогии, но и делает замечания об использовании этого метода, который является "не только законным продуктом науки, но и способен в свою очередь генерировать науку" [30]. Максвелл говорит о двух видах использования физической аналогии в научных исследованиях: перенос решения проблемы из одной области физики в другую, который можно проиллюстрировать примерами из электричества и магнетизма, и более важный: неполной аналогии. Попытка сделать неполную аналогию полной предполагает поиск новых путей исследования, что, по мнению Максвелла, является формирующим принципом науки. Выдающиеся примеры второго типа физической аналогии — математическая теория поля и электромагнетическая теория света самого Максвелла.

Заключение

Представлена история параллельного развития теории упругости, контактной механики и электростатики/гравитации и показано, что физическая схожесть потенциала в случае гравитации и электрического взаимодействия с фундаментальным решением в теории упругости способствовала переносу методов и решений из теории гравитации сначала в электростатику (Пуассон). Это привело к разработке решений в электростатике, которые в дальнейшем были использованы в механике контактных взаимодействий и теории упругости (Герц, Инглис). Эти решения, в свою очередь, использовал Гриффитс для решения задачи о распространении трещины. Идеи Гриффитса незначительно переформулировали Джонсон, Кендалл и Робертс и применим в теории адгезионного контакта.

Такой перенос прослеживается через всю историю науки и показывает, что перенос знаний во многих случаях является одним из самых результативных методов "создания" нового знания и даже новых областей науки. Экзаптация (т.е. использование свойства для функции, для которой оно не было изначально создано) в настоящее время осознается как механизм происхождения крупных инноваций и в эволюции [31, 32].

На примере Кулона может быть прослежен и еще один любопытный случай переноса знаний. Кулон известен прежде всего благодаря двум "Законам Кулона" — законе о сухом трении и законе о взаимодействии электрических зарядов. Своим законом взаимодействия электрических зарядов Кулон не только внес решающий вклад в теорию электричества, но и (не предполагая этого) в теорию упругости и контактной механики последующих двух столетий. Работа Кулона по трению и последующее развитие его идей — захватывающий пример переноса идей и методов: например, представление Кулона о физической природе трения, которое позднее трансформировалось в "Модель Прандля—Томлинсона" и аналогичные модели — наиболее часто используемые концепции в теории пластичности и нанотрибологии [33, 34].

Авторы выражают благодарность М. Попову, Е. Вилерту, А. Филиппову, И. Буяновскому и Дж. Барберу за ценные замечания.

Библиографический список

1. **Holton Gerald.** Themata Zur Ideengeschichte der Physik. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 1984. P. 2.
2. **Розов М.А.** Пути научных открытий. (К критике историко-научной концепции Т. Куна) // Вопросы философии. 1981. № 8. С. 138—147.
3. **Coulomb C.A.** Essai sur une application des regles de Maximis & Minimis a quelques Problemes de Statique, relatifs a l'Architecture // Memoires de Mathematique & de Physique, presentes a l'Academie des Sciences par divers Savans, & lus dans ses Assemblees. 1773. Vol. 7. P. 343—382.
4. **Heyman J.** Coulomb's memoir on statics. An Essay in the History of civil engineering. London: Imperial College Press, 1997. 212 p.
5. **Gillmor C.S.** Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France. Princeton: Princeton University Press, 1971. 328 p.
6. **Coulomb C.A.** Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de metal // Histoire de l'Académie Royale des Sciences. 1784. P. 229—269.
7. **Coulomb C.A.** Premier mémoire sur l'électricité et le magntisme // Histoire de l'Académie Royale des Sciences. 1785. P. 569—577.
8. **Landau L.D., Lifshitz E.M.** Theory of Elasticity // Course of Theoretical Physics. Vol. 7. Pergamon Press. 1959.
9. **Landau L.D., Lifshitz E.M.** The classical theory of fields. Addison-Wesley Pub. Co; 1st edition 1951.
10. **Дорфман Я.Г.** Всемирная история физики. М., 1974. 296 с.
11. **Poisson S.D.** Traite de mechanique. 1. Paris: Courcier. 1811. 507 p.
12. **Poisson S.D.** Traite de mechanique. 2. Paris: Courcier. 1811. 500 p.
13. **Todhunter I.** A history of the mathematical theories of attraction and the figure of the earth from the time of Newton to that of Laplace. London: Macmillan and co., 1873. 516 p.
14. **Hertz H.** Ueber die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte Mathematik. 1882. Vol. 92. P. 156—171.
15. **Boussinesq J.** Applications des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. Paris: Gauthiers-Villars, 1885.
16. **Inglis C.E.** Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners // Proc. Inst. Naval Architects. 1913. P. 219—241.
17. **Griffith A.A.** The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921, 221, 582—593.
18. **Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D.** Surface energy and the contact of elastic solids // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1971. Vol. 324 (1558). P. 301—313.
19. **Barquins M.** Adherence and rolling kinetics of a rigid cylinder in contact with a natural rubber surface // J. Adhesion. 1988. Vol. 26. P. 1—12.
20. **Goethe J.-W.** Werke // Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 16th edition 1996. Band 1. P. 230.
21. **Cheng A.H.-D., Cheng Daisy T.** Heritage and early history of the boundary element method // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2005. Vol. 29. P. 268—302.
22. **Pohrt R., Popov V.L.** Adhesive contact simulation of elastic solids using local mesh-dependent detachment criterion in Boundary Elements Method // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2015. Vol. 13. No. 1. P. 3—10.
23. **Hulikal S., Bhattacharya K., Lapusta N.** A threshold-force model for adhesion and mode I fracture, arXiv: 1606.03166.
24. **Rey V., Anciaux G., Molinari J.-F.** Normal adhesive contact on rough surfaces: efficient algorithm for FFT-based BEM resolution // Comput. Mech. DOI: 10.1007/s00466-017-1392-5.
25. **Bazrafshana M., de Rooijb M.B., Valefic M., Schipperb D.J.** Numerical method for the adhesive normal contact analysis based on a Dugdale approximation // Tribology International. 2017. Vol. 112. P. 117—128.
26. **Popov V.L., Pohrt R., Li Q.** Strength of adhesive contacts: Influence of contact geometry and material gradients // Friction. 2017. Vol. 5. No. 3. P. 308—325.
27. **Argatov I.I., Li Q., Pohrt R., Popov V.L.** Johnson-Kendall-Roberts Adhesive Contact for a Toroidal Indenter // Proceedings of the Royal Society of London, Series A. 472 (2191): (2016).
28. **Кун Томас.** Структура научных революций. М.: Прогресс, 1975.
29. **Purrington Robert D.** Physics in the Nineteenth Century. London: Rutgers University Press, 1997. 249 p.
30. **Turner Joseph.** Maxwell on the Method of Physical Analogy // The British Journal fort he Philosophy of Science. Vol. 6. № 23. 1955. P. 226—238.
31. **Margulis L.** Symbiotic Planet: A New Look at Evolution. Basic Books. 1998. 154 p.
32. **Gould S.J., Vrba E.S.** Exaptation — A missing term in science of form, Palebiology. 1982. Vol. 8. No. 1. P. 4—15.
33. **Popova E., Popov V.L.** The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction // Friction. 2015. Vol. 3. No. 2. P. 183—190.
34. **Popov V.L., Gray J.A.T.** Prandtl-Tomlinson model: History and applications in friction, plasticity, and nanotechnologies // ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2012. Vol. 92. No. 9. P. 683—708.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.09.2018. Подписано в печать 30.10.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.