

2. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики. М.: Техносфера, 2013. 240 с.
3. Arai Y., Maeda A., Shiozawa K. e.a. Chemical forms of solid fission products in the irradiated uranium-plutonium mixed nitride fuel. — J. Nucl. Mater., 1994, v. 210, p. 161—166.
4. Булатов Г.С., Гедговд К.Н., Любимов Д.Ю. Термодинамический анализ химического и фазового составов облученного быстрыми нейтронами уран-плутониевого нитрида в зависимости от температуры и выгорания. — Материаловедение, 2009, № 1(142), с. 2—7.
5. Любимов Д.Ю., Андросов А.В., Булатов Г.С. и др. Термодинамическое моделирование фазового состава смешанного уран-плутониевого моноснитрида при облучении быстрыми нейтронами до выгорания 80 ГВт-сут/т и температуре 900—1400 К. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 4, с. 198—202.
6. Arai Y., Morihira M., Ohmichi T. The effect of oxygen impurity on the characteristics of uranium and uranium-plutonium mixed nitride fuels. — J. Nucl. Mater., 1993, v. 202, p. 70—78.
7. Любимов Д.Ю., Андросов А.В., Булатов Г.С. и др. Термодинамическое моделирование растворения кислорода в моноснитриде урана при температуре 900—1400 К. — Радиохимия, 2014, т. 56, № 5, с. 423—426.
8. Трусев Б.Г. Термодинамический метод анализа высокотемпературных состояний и процессов и его практическая реализация. Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1984.
9. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.Н. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1978. 432 с.
10. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Федоров Ю.Е. и др. Результаты испытаний смешанного моноснитридного топлива $U_{0,55}Pu_{0,45}N$ и $U_{0,4}Pu_{0,6}N$ в реакторе БОР-60 до выгорания 12% тяж. ат. — Атомная энергия, 2011, т. 110, вып. 6, с. 332—346.
11. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Прошкин А.А. Моноснитридное топливо для быстрых реакторов. — Там же, 2003, т. 95, вып. 3, с. 208—221.
12. Matsui H., Tamaki M. Electrical Resistivity of β - U_2N_3 . Japan, Nagoya University, 1982, p. 121—125.
13. Kurosaki K., Matsudab T., Unoa M. e.a. Thermoelectric properties of $BaUO_3$. — J. Alloys and Compounds, 2001, v. 319, p. 271—275.
14. Kurosaki K., Kobayashi H., Uno M. e.a. Thermal conductivities of uranium intermetallic compounds. — J. Nucl. Sci. Techn., 2002, № 3, p. 811—814.
15. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд-е. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
16. Tanaka K., Sato I., Hirose T. e.a. Thermophysical properties of perovskite type alkaline-earth metals and plutonium complex oxides. — J. Nucl. Mater., 2012, v. 422, p. 163—166.
17. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: a Tutorial and Collection of Data. Vienna: IAEA, 2008. 191 p.
18. Koumoto K., Seo W.S., Ozawa S. Huge thermopower of porous Y_2O_3 . Japan, Nagoya University, 464-01, 1997.
19. Kovalev N.N., Petrov A.V., Sorokin O.V. Thermal conductivity of single-crystals of barium, strontium, calcium, and magnesium oxides. — Sov. Phys. Solid State, 1971, v. 13, p. 232—233.
20. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. — Журн. технической физики, 1951, т. 21, вып. 6, с. 667—685.
21. Deforest D.L. Transient Fission Gas Behaviour in Uranium Nitride Fuel Under Proposed Space Applications. US, Texas A&M University, 1991. 246 p.
22. Klipfel M., Marcello V. Di, Schubert A. e.a. Towards a multiscale approach for assessing fission product behaviour in UN. — J. Nucl. Mater., 2013, v. 442, p. 253—261.

Поступила в Редакцию 12.12.14

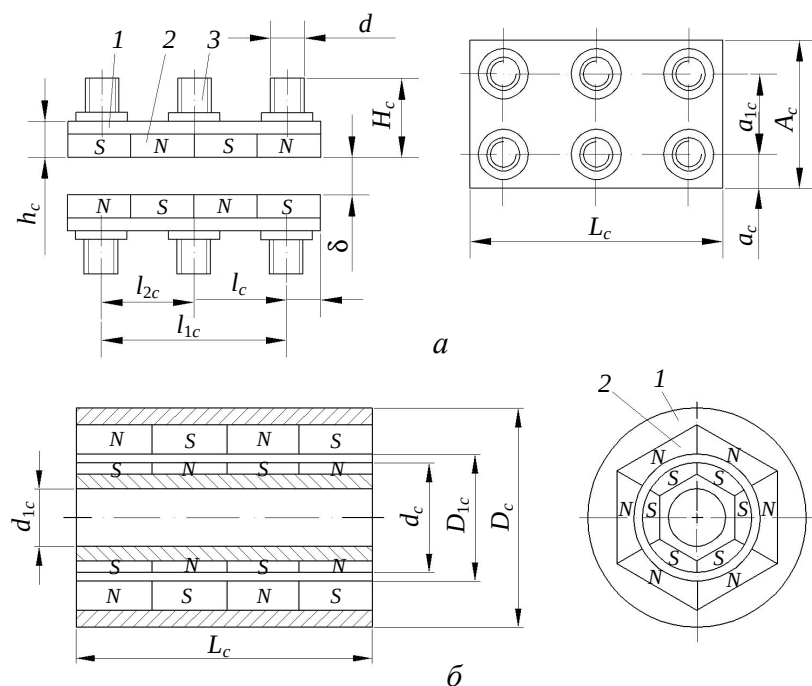
УДК 621.825.038

СТАНДАРТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ И МАГНИТНЫХ МУФТ ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Красильников А.Я. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург),
Красильников А.А. (ОАО «СвердНИИХиммаш», г. Екатеринбург)*

Теоретические и экспериментальные исследования герметичного оборудования для радиохимического производства позволили создать оптимальные конструкции магнитных систем для поступательного движения и магнитных муфт для передачи вращательного движения с магнитами из высококоэрцитивных материалов и разработать руководящие документы (отраслевые стандарты) [1, 2].

Отличие герметичных машин и аппаратов, в приводе которых используются магнитные системы и муфты, от других заключается в передаче тяговых усилий (крутящих моментов) за счет магнитных сил, действующих между полюсами секций магнитной системы (полумуфт магнитной муфты) без контакта частей секций (полумуфт), наличии упругой магнитной связи и возможности ее разрыва, а также перемещающегося (вращающегося) магнитного поля.



Р и с. 1. Магнитная плоская (а) и цилиндрическая система (б): 1 — магнитопровод; 2 — магнит; 3 — шпилька

Цель разработки стандартных рядов магнитных систем и муфт состояла в установлении унифицированных рядов типоразмеров с учетом опыта их изготовления и эксплуатации. Задача разработки стандартов — выпуск нормативных документов, которые устанавливают типы и основные размеры магнитных систем и магнитных

муфт, единых для всех предприятий атомной отрасли с учетом возможности применения и в других отраслях промышленности.

Магнитные системы. С помощью магнитных систем передается поступательное движение в герметичные боксы, камеры, коробка транспортеров без использования специальных проходок.

Стандартные магнитные системы выполнены в виде двух типов: плоских и цилиндрических (рис. 1, табл. 1, 2). Каждая магнитная система состоит из двух секций. При ее установке в приводе машины одна из секций монтируется на ведущей, вторая на ведомой транспортной тележке, расположенной в рабочей зоне. Перегородка (экран) в воздушном зазоре между тележками герметично отделяет

рабочую зону машины от внешней среды. Секция представляет собой активную часть системы и состоит из магнитопровода и постоянных оксидно-барьерных магнитов. Магниты располагаются в секции таким образом, что их полюса, обращенные в сторону второй секции, чередуются в направлении перемещения, проти-

Таблица 1. Основные размеры плоских магнитных систем, мм

Обозначение СМП— $A_c \times L_c$	A_c	a_c	a_{1c}	L_c	l_c	l_{1c}	l_{2c}	H_c	h_c	d	Тяговое усилие при $\delta = 6,3$ мм, не менее Н
СМП—60×100	60	30	—	160	20	120	—	52	22	M8	100
СМП—80×160	80	40	—	160	20	120	—	52	22	M8	125
СМП—120×160	120	20	80	160	20	120	—	54	24	M8	200
СМП—120×240	120	20	80	240	20	200	—	54	24	M8	320
СМП—160×240	160	40	80	240	20	200	—	56	26	M10	400
СМП—160×320	160	40	80	320	60	200	—	56	26	M10	500
СМП—200×320	200	40	120	320	60	200	—	63	28	M12	600
СМП—200×400	200	40	120	400	60	280	140	63	28	M12	800

Таблица 2. Основные размеры цилиндрических магнитных систем, мм

Обозначение СМЦ— $d_c \times L_c$	D_c	D_{1c}	d_c	d_{1c}	L_c	Тяговое усилие, не менее Н
СМЦ—63×160	128	82	63	20	160	160
СМЦ—63×240	128	82	63	20	240	250
СМЦ—90×320	160	114	90	45	320	400
СМЦ—140×320	210	165	140	95	320	630
СМЦ—140×480	210	165	140	95	480	1000

воположные полюса замкнуты магнитопроводом. При необходимости секции облицовываются коррозионно-стойкой сталью.

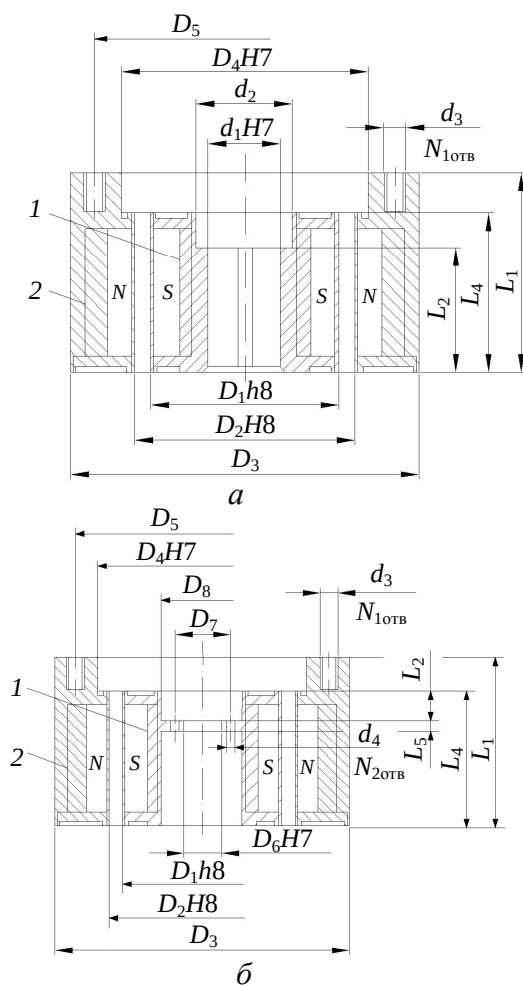
Размеры плоских магнитных систем выбраны из условий рационального раскроя заготовок постоянных магнитов, поставляемых обычно в виде плиток размером 120×80×16 мм. Оптимальная ширина магнита при воздушном зазоре δ от 6,3 до 16 мм и максимальном тяговом усилии от 100 до 800 Н составляет 35—40 мм. Определяющими размерами являются длина L_c и ширина A_c . Эти размеры заложены в обозначение магнитной системы как СМП— $A_c \times L_c$.

Размеры цилиндрических магнитных систем выбраны исходя из оптимальной ширины магнита, обеспечения тяговых усилий до 1000 Н и возможности использования в качестве экрана немагнитных коррозионно-стойких труб стандартных размеров. Приняты три наружных диа-

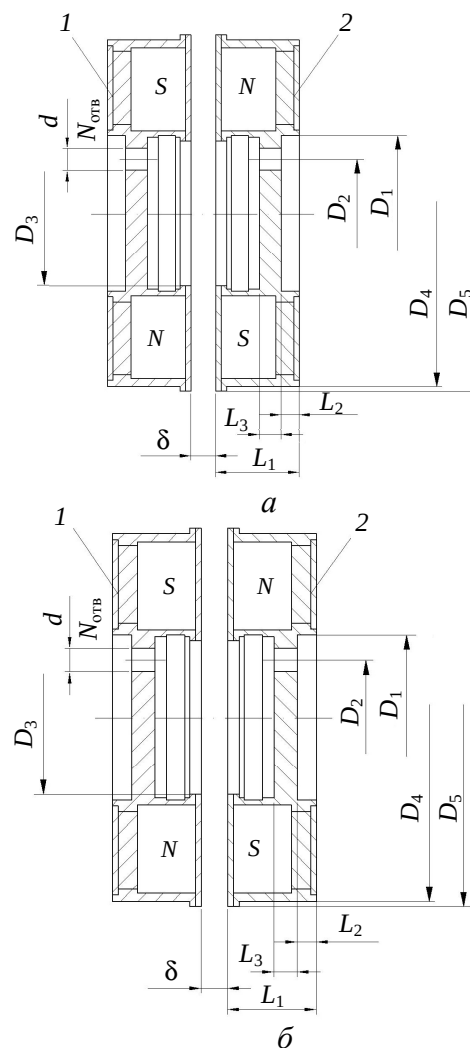
метра внутренних секций систем: 63, 90, 140 мм. Определяющими размерами являются длина магнитной системы L_c и наружный диаметр внутренней секции d_c . Эти размеры заложены в обозначение магнитной системы как СМЦ— $d_c \times L_c$.

Магнитные системы передают заданные тяговые усилия в диапазоне температуры от –50 до 50 °С.

Магнитные муфты. С помощью магнитных муфт передается вращательное движение через экран в рабочий объем герметичных насосов, компрессоров, перемешивающих устройств, газодувок и др. [3]. По конструктивному исполнению они делятся на цилиндрические и торцовые. Цилиндрическая муфта включает в себя наружную и внутреннюю полумуфты, торцовая — две одинаковые полумуфты (рис. 2, 3, табл. 3, 4). Полумуфта состоит из магнитопро-



Р и с. 2. Магнитная цилиндрическая муфта в первом (а) и втором исполнении (б): 1, 2 — наружная и внутренняя магнитная полумуфта соответственно



Р и с. 3. Магнитная торцовая муфта в первом (а) и втором исполнении (б): 1, 2 — полумуфты

Таблица 3. Основные размеры цилиндрических магнитных муфт, мм

Обозначение	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	d_1	d_2	d_3	d_4	L_1	L_2	L_4	L_5	Число		Исполнение
																	N_1	N_2	
ММЦ—2,5*	72	80	125	95	110	—	—	—	16	26	M8	—	62	40	48	—	6	—	1
ММЦ—4,5	72	80	125	95	110	—	—	—	16	26	M8	—	82	50	68	—	6	—	1
ММЦ—6,3	91	99	150	120	135	—	—	—	22	43	M8	—	62	40	48	—	6	—	1
ММЦ—10,0	91	99	150	120	135	—	—	—	22	43	M8	—	82	50	68	—	6	—	1
ММЦ—16,0	126	134	180	150	165	—	—	—	25	75	M8	—	105	60	88	—	8	—	1
ММЦ—25,0	126	134	180	150	165	—	—	—	25	75	M8	—	145	60	128	—	8	—	1
ММЦ—40,0	181	195	250	210	230	71	90	120	—	—	M10	9	150	30	128	8	8	6	2
ММЦ—63,0	181	195	250	210	230	71	90	120	—	—	M10	9	190	30	168	8	12	6	2
ММЦ—100,0	261	265	325	280	305	120	150	190	—	—	M10	11	195	30	168	10	12	6	2
ММЦ—160,0	261	265	325	280	305	120	150	190	—	—	M10	11	275	30	248	10	12	6	2
ММЦ—250,0	361	383	440	400	420	220	260	300	—	—	M10	11	280	30	248	10	12	8	2
ММЦ—400,0	361	383	440	400	420	220	260	300	—	—	M10	11	400	30	400	10	12	8	2

*ММЦ — муфта магнитная цилиндрическая, 2,5 — передающий крутящий момент, не менее 2,5 Н·м.

Таблица 4. Основные размеры торцовых магнитных муфт, мм

Обозначение	δ	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	d	L_1	L_2	L_3	Число отверстий	Исполнение
ММТ—1,0*	4	35	16	35	83	85	—	6	22,5	5	4	2	1
ММТ—1,6	4	40	18	40	93	95	—	7	22,5	5	4	2	1
ММТ—2,5	4	45	27	43	105	107	—	7	22,5	5	6	2	1
ММТ—4,0	4	56	30	53	125	127	—	7	22,5	5	6	3	1
ММТ—6,3	4	65	40	63	145	147	—	7	24,5	5	8	3	1
ММТ—10,0	4	50	65	75	175	177	80	M8	26,0	—	10	4	2
ММТ—16,0	7	60	80	93	208	210	95	M8	28,0	—	10	6	2
ММТ—25,0	7	80	100	110	243	245	115	M10	28,0	—	10	6	2
ММТ—40,0	7	95	110	128	278	280	125	M10	30,0	—	15	6	2
ММТ—63,0	7	105	125	153	328	330	155	M10	30,0	—	15	6	2
ММТ—100,0	7	130	155	183	388	390	185	M12	32,0	—	20	8	2
ММТ—160,0	7	160	185	218	458	460	218	M12	32,0	—	20	8	2

*ММТ — муфта магнитная торцовая, 1,0 — передающий крутящий момент, не менее 1 Н·м.

вода, выполненного из магнитомягкой стали, и постоянных оксидно-бариевых магнитов, облицована коррозионно-стойкой сталью. При установке в приводе машины одна полумуфта крепится к электродвигателю, вторая — к валу рабочего органа машины. В воздушном зазоре между ведущей и ведомой полумуфтами устанавливаются экран из коррозионно-стойкой стали или титанового сплава.

Стандарт содержит конструкцию, габаритные и установочные размеры 12 цилиндрических и 10 торцовых муфт, технические требования на их изготовление применительно к аппаратам и машинам, работающим под давлением до 4 МПа.

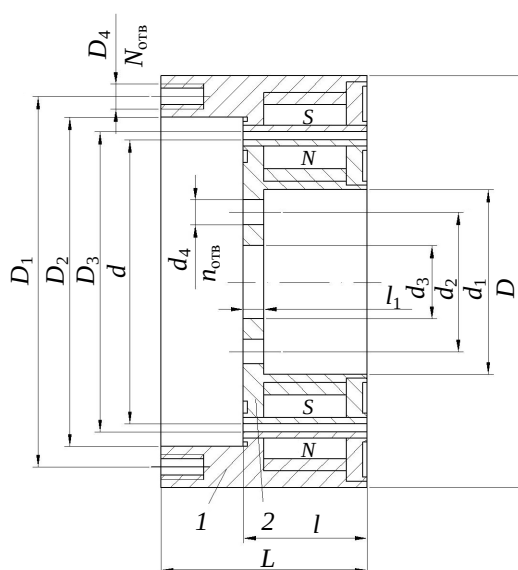
В стандарте приведены справочные данные, необходимые для машин с магнитными муфтами: масса, момент инерции полумуфт, максимально допустимая частота вращения. Для торцовых магнитных муфт, кроме номинальных, указаны крутящие моменты при разных зазорах. Это позволяет расширить область применения таких муфт при ограниченном числе диаметров [4]. Диапазон рабочей температуры от -50 до 100 °С.

В начале 1990-х годов приступили к созданию герметичных насосов, в приводе которых используется цилиндрическая магнитная муфта, выполненная на основе постоянных самарий-кобальтовых магнитов КС37 и КС25. Такие маг-

ниты в дополнение к оксидно-бариевым при одних и тех же размерах дают возможность более чем в 6 раз повысить передающий крутящий момент. На цилиндрические магнитные муфты разработаны технические условия А.97.242.00.000 ТУ (разработчик ОАО «СвердНИИХиммаш») и полный комплект конструкторской документации.

Технические условия содержат конструкцию, геометрические и установочные размеры 400 магнитных муфт, технические требования на их изготовление. Максимальный крутящий момент муфт — от 4 до 990 Н·м, диапазон рабочей температуры от -40 до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ для муфт с магнитами КС37, от -40 до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ — для КС25.

Основные размеры на два основных диаметра внутренней полумуфты d 121, 134 мм (число магнитов в полумуфтах 16 и 18 соответственно) приведены на рис. 4 и в табл. 5. Та-



Р и с. 4. Цилиндрическая муфта с самарий-кобальтовым магнитом: 1, 2 — наружная и внутренняя магнитная полумуфта соответственно

Таблица 5. Основные размеры магнитных муфт с зазором $\delta = 4$ мм, мм

Обозначение	L	l	l ₁	D	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	d	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	Число	
														N	n
ММЦ—01(02)—20(35)—121—4К(Е,Т)	61	30	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—34(58)—121—4К(Е,Т)	71	40	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—47(82)—121—4К(Е,Т)	81	50	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—61(105)—121—4К(Е,Т)	91	60	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—74(130)—121—4К(Е,Т)	101	70	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—88(155)—121—4К(Е,Т)	111	80	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—100(175)—121—4К(Е,Т)	121	90	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—115(200)—121—4К(Е,Т)	131	100	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—130(220)—121—4К(Е,Т)	141	110	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—140(250)—121—4К(Е,Т)	151	120	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—155(270)—121—4К(Е,Т)	161	130	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—170(290)—121—4К(Е,Т)	171	140	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—180(320)—121—4К(Е,Т)	181	150	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—195(340)—121—4К(Е,Т)	191	160	8	172	155	140	129	8	121	80	70	55	8	8	4
ММЦ—01(02)—25(43)—134—4К(Е,Т)	65	30	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—42(72)—134—4К(Е,Т)	75	40	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—59(100)—134—4К(Е,Т)	85	50	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—76(130)—134—4К(Е,Т)	95	60	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—92(160)—134—4К(Е,Т)	105	70	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—110(190)—134—4К(Е,Т)	115	80	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—125(220)—134—4К(Е,Т)	125	90	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—145(250)—134—4К(Е,Т)	135	100	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—160(280)—134—4К(Е,Т)	145	110	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—175(300)—134—4К(Е,Т)	155	120	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—195(330)—134—4К(Е,Т)	165	130	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—210(360)—134—4К(Е,Т)	175	140	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—230(390)—134—4К(Е,Т)	185	150	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6
ММЦ—01(02)—240(420)—134—4К(Е,Т)	195	160	8	185	170	154	142	8	134	94	80	66	8	12	6

кие муфты нашли широкое применение в радиохимической и химических отраслях промышленности, представлены 28 вариантами с крутящим моментом от 20 до 420 Н·м.

В качестве примера приведем расшифровку условного обозначения магнитной муфты по техническим условиям А.97.242.00.000 ТУ (см. табл. 5): ММЦ—01(02)—100(175)—121—4К(Е,Т) — ММЦ — муфта магнитная цилиндрическая; 01(02) — исполнение по диапазону рабочей температуры (до 150 и до 200 °С с магнитами из сплава редкоземельных элементов КС37 и КС25 соответственно); 100(175) — крутящий момент магнитной муфты, 100 Н·м при температуре 20 ± 5 °С с магнитами из сплава редкоземельных элементов КС37 (175 Н·м с магнитами из сплава редкоземельных элементов КС25); 121 — наружный диаметр внутренней полумуфты d 121 мм; 4 — воздушный зазор между полумуфтами (разность между размером D_3 и d) 4 мм; К — материал облицовки внутренней полумуфты — сталь 12Х18Н10Т; Е — материал облицовки внутренней полумуфты — сталь 10Х17Н13М2Т; Т — материал облицовки внутренней полумуфты — титановый сплав ВТ1—0.

Магнитные системы и магнитные муфты разработаны и изготавливаются ОАО «СвердНИИхиммаш» [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Устройства** магнитные для передачи поступательного движения через перегородку (зазор). Основные параметры и размеры. РД 95.10009—89. Взамен ОСТ 95 10009—83. Введ. с 14.08.89. СвердловНИИхиммаш. Свердловск, 1989. 17 с.
2. **Муфты** магнитные. Конструкция. РД 95.840—89. Взамен ОСТ 95 840—80. Введ. с 01.01.90. СвердловНИИхиммаш. Свердловск, 1989. 21 с.
3. **Добротворский В.В., Красильников А.Я., Сухоросов Л.Н.** Герметичное оборудование с магнитными муфтами. — Хим. и нефтяное машиностроение, 1994, № 6, с. 39.
4. **Красильников А.Я.** Методика выбора магнитной муфты для герметичного насоса. — Там же, 2001, № 2, с. 24—26.
5. **Красильников А.Я.** Герметичное оборудование. Особенности использования магнитной муфты в конструкциях герметичных машин. Монография. Германия: LAP LAMBERT Academic Publ., 2012. 300 с.

Поступила 25.01.14

В окончательной редакции 14.01.15

УДК 543.51

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ БЕРИЛЛИЯ С ПОМОЩЬЮ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ЭРИАД

Баженев А.Н., Фомина Н.С. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург),

Галль Н.Р. (Санкт-петербургский гос. политехнический ун-т),

Галль Л.Н. (Ин-т аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург),

Семенов А.А., Кудрявцев В.Н., Лизунов А.В., Лесина И.Г. (ОАО «ВНИИИМ», г. Москва)

Целью настоящей работы является определение возможности применения масс-спектрометрии с источником ионов ЭРИАД (электро-распыление с управляемой фрагментацией и атомизацией ионов в источнике) для экспрессного определения малой концентрации бериллия в воздухе. Бериллий является важным материалом, используемым в металлургии как легирующая добавка, в современной микроэлектронике и атомной промышленности. Его годовое производство составляет несколько десятков тонн, и потребность в нем постоянно возрастает.

Бериллий является одним из токсичных элементов. В нашей стране приняты жесткие нормы, допускающие предельную концентрацию в воздухе рабочей зоны, где он обычно существует в виде оксида или солей, адсорбированных на частичках пыли, не более 10^{-6} г/м³. Имеются значительные трудности в инструментальном контроле за соблюдением этих требований: принятые методики предполагают многостадийную пробоподготовку, включающую концентрирование пробы и химическое выделение [1]. Данная методика не позволяет проводить экспрессный анализ содержания бериллия