

# Осевой электромагнит как элемент системы активного магнитного подвеса

А.В. Андрианов, Э.В. Сусликов, Г.П. Страхов, А.М. Ахметзянов, А.П. Харитонов  
(ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

niitk@kazan.ru

Рассмотрены варианты исполнения осевых электромагнитов активных магнитных подшипников для центробежных компрессоров и проведен сравнительный анализ их расчетных характеристик. Определен ряд унифицированных конструкций магнитопроводов осевых электромагнитов, целесообразный для применения в шести базовых конструкциях центробежных компрессоров, разрабатываемых в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (Группа ГМС).

**Ключевые слова:** центробежный компрессор, активный магнитный подвес, осевой электромагнитный подшипник, электромагнит, магнитопровод.

**Axial electromagnet as an element of active magnetic suspension system**  
A.V. Andrianov, E.V. Suslikov, G.P. Strakhov, A.M. Ahmetzjanov, A.P. Kharitonov  
(Joint-Stock Company «NII turbocompressor n.a. V.B. Shnepp», HMS group)

The axial electromagnets design versions in active magnetic bearings for centrifugal compressors are considered and the comparative analysis of their design characteristics is carried out. A range of unified magnetic circuit designs for axial electromagnets expedient for application in six basic designs of centrifugal compressors developed by JSC «NII turbocompressor n.a. V.B. Shnepp» (HMS group) is defined.

**Keywords:** centrifugal compressor, active magnetic suspension, axial magnetic bearing, electromagnet, magnetic circuit.

В статье [1] рассмотрены вопросы конструктивного исполнения и расчета конструктивных, нагрузочных и электрических характеристик радиальных и осевых электромагнитов, входящих в систему активного магнитного подвеса (АМП).

Вариант конструкции осевого электромагнита двухстороннего действия системы АМП приведен на рис. 1. Осевой электромагнит содержит ротор в виде упорного диска 2, установленного на вращающемся валу 1 машины, и статор в виде двух кольцевых электромагнитов (ЭМ) 4 с обмотками возбуждения 5, установленных в корпусе 3 подшипникового узла. Магнитопроводы упорного диска 2 и кольцевых электромагнитов 4 выполняются из литых или кованных заготовок из низкоуглеродистой стали, обладающей свойствами магнитомягких ферромагнитных материалов (Ст.3 – Ст.10 или аналогичные по магнитным свойствам сплавы).

При пропускании электрического тока через обмотки возбуждения 5 в магнитопроводах статора и ротора создаются замкнутые магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , а в зазорах между полюсами статоров ЭМ и упорным диском 2 возникают электромагнитные силы притяжения  $F_1$  и  $F_2$ . Результирующая сила, действующая на упорный диск ротора, определяется разностью векторов сил  $F_1$  и  $F_2$  и направлена вдоль оси ротора машины. Стабилизация ротора осуществляется путем регулирования тока в обмотках правого и левого ЭМ так, чтобы разность сил притяжения удерживала ротор в центральном положении.

На рис. 2 приведены конфигурации кольцевых электромагнитов с П-образной зоной притяжения (рис. 2, а) и с Ш-образной зоной притяжения (рис. 2, б). В ряде случаев ЭМ с Ш-образной зоной притяжения позволяет оптимизировать осевой размер ЭМ и упорного диска.

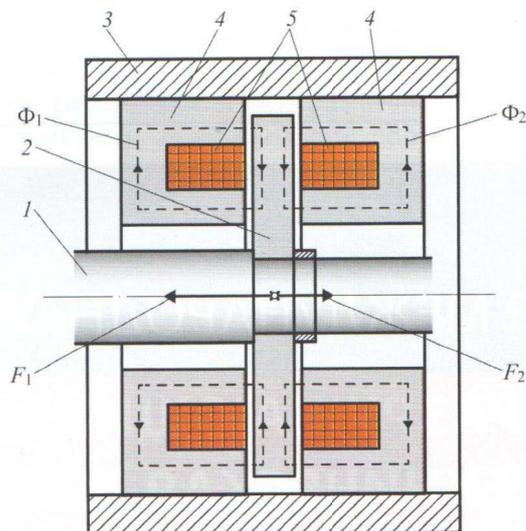


Рис. 1. Конструкция осевых электромагнитов системы магнитного подвеса

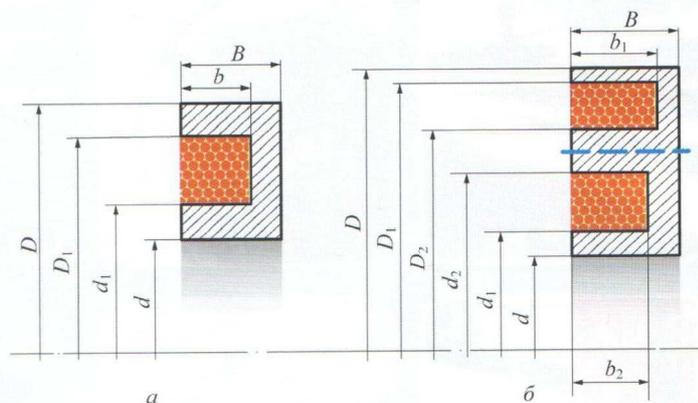


Рис. 2. Конфигурации магнитопроводов осевых электромагнитов

Показатель	Номер базы корпуса центробежного компрессора					
	1	2	3	4	5	6
Диаметр колес ЦК, мм	240	300	380	480	600	750
Масса ротора (максимальная), кг	100	200	300	400	700	1 200
Диаметр шейки вала, мм	45	55	65	75	95	135
Частота вращения ротора (максимальная), об/мин	24 000	20 000	16 000	12 000	10 000	7 500
Диаметр корпуса подшипника (максимальный), мм	300	320	360	400	550	600
Осевая сила нагрузки (максимальная), кН	10	10	15	20	30	40

С целью равномерного распределения индукции вдоль линии замыкания магнитных потоков конструкция магнитопровода ЭМ должна по возможности иметь участки с сечениями одинаковой площади.

Оптимум конструкции электромагнита при расчете определяется ограничительными критериями (диаметром или длиной, электрическими потерями, расходом меди, нагревом элементов электромагнита в рабочих режимах и т.д.) и в общем случае не может быть сформулирован однозначно.

Далее рассмотрим удельные возможности двухполюсной (с П-образной зоной притяжения) и трехполюсной (с Ш-образной зоной притяжения) конструкций магнитопроводов, исходя из ограничений, вносимых конструкцией компрессора, применительно к конструкциям осевых подшипников, проектируемых ЗАО «НИИ-турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа».

Для расчета конструктивных характеристик ЭМ заданы базовые параметры:

- внешний диаметр статора ЭМ и упорного диска ( $D$ , м);
- внутренний диаметр статора ЭМ ( $d$ , м);
- максимальное значение индукции магнитных потоков в зазорах ( $B_m$ , Т);
- коэффициент заполнения паза статора ЭМ медью обмотки ( $K_o$ );
- зазор между ЭМ и упорным диском ( $\delta$ , м);
- плотность тока в обмотках возбуждения ЭМ ( $J_i$ , А/м<sup>2</sup>).

В табл. 1 приведены требования к конструктивным характеристикам электромагнитов осевых подшипников для шести баз корпусов центробежных компрессоров.

Расчет конструктивных характеристик ЭМ (см. рис. 2, а) осуществляется по следующим соотношениям:

$$S_c = F_x \mu_0 / B_m^2;$$

$$D_1 = \sqrt{(D^2 - 4S_c/\pi)};$$

$$d_1 = \sqrt{(d^2 + 4S_c/\pi)};$$

$$I_w = 2\delta B_m / \mu_0;$$

$$b = 2I_w / [K_o J_i (D_1 - d_1)];$$

$$B = b + (d_1 - d) / 2;$$

$$P_{em} = \rho_o I_w J_i \pi (D_1 + d_1) / 2;$$

$$b_d = 0,65(d_1 - d),$$

где  $S_c$  – суммарное сечение контура замыкания магнитного потока в магнитопроводе ЭМ, м;  $F_x$  – максимальная сила притяжения электромагнита, Н/м;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздушного зазора, Гн/м;  $I_w$  – суммарная магнитодвижущая сила (МДС) обмотки, создающая магнитный поток в контуре магнитопровода ЭМ;  $P_{em}$  – потребляемая мощность, необходимая для создания максимального магнитного потока с индукцией  $B_m$  в зазоре ЭМ, Вт;  $\rho_o$  – удельное сопротивление провода обмотки, Ом·м;  $b_d$  – минимальная осевая толщина упорного диска (из условий прочности и проводимости магнитного потока), м.

Показатель	Номер базового корпуса центробежного компрессора					
	1	2	3	4	5	6
Осевая сила ЭМ $F_x$ , кН	10	10	15	20	30	40
Диаметр статора ЭМ и упорного диска $D$ , мм	200	250	300	340	470	500
Внутренний диаметр статора ЭМ $d$ , мм	75	85	95	105	125	165
Зазор между ЭМ и упорным диском $\delta$ , мм	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Размер $B$ статора ЭМ, мм: ● с П-образной зоной; ● с Ш-образной зоной	63 85,6	43 49	47 48	50 46	52 37	56 42
Размер $b_d$ диска, мм: ● с П-образной зоной; ● с Ш-образной зоной	34 18	32 18	40 20	48 20	60 25	64 30
Потребляемая мощность, Вт: ● с П-образной зоной; ● с Ш-образной зоной	42 79	51 96	68 128	77 144	115 215	127 239

Расчет конструктивных характеристик трехполюсных ЭМ (см. рис. 2, б) осуществляется по аналогичным соотношениям путем представления ЭМ с Ш-образной зоной притяжения в виде двух ЭМ (разделены синей штриховой линией на рис. 2, б) с П-образной зоной притяжения. Соответствующим образом изменяются исходные данные для каждого из двух ЭМ.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты расчета осевых электромагнитов для центробежных компрессоров шести базовых корпусов (с исходными данными по табл. 1) при заданных значениях  $B_m = 1,35$  Тл;  $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $J_i = 3$  А/мм<sup>2</sup>,  $K_0 = 0,5$ .

Данные расчетов характеристик ЭМ показывают, что для корпусов ЦК от 4-й до 6-й базы осевые электромагниты с Ш-образными зонами притяжения имеют существенно меньшие осевые размеры и массу электромагнитов и упорных дисков, но потребляют вдвое большую электрическую мощность.

Необходимо отметить, что уменьшение зазора  $\delta$  между статорами ЭМ и упорным диском приводит к уменьшению осевых размеров и потребляемой мощности.

Расчет тяговой характеристики осуществляется после расчета конструкции ЭМ и выбора максимального значения рабочего тока, которое определяется возможностями усилителей мощности блока управления АМП.

При известном максимальном токе обмоток определяется число витков обмоток возбуждения  $w$ .

Для расчета статической тяговой характеристики задан ряд параметров:

- сечение участков контура замыкания магнитного потока  $S_c$ , м;
- зазор между левым статором ЭМ и упорным диском  $\delta_1$ , м;
- зазор между правым статором ЭМ и упорным диском  $\delta_2$ , м;

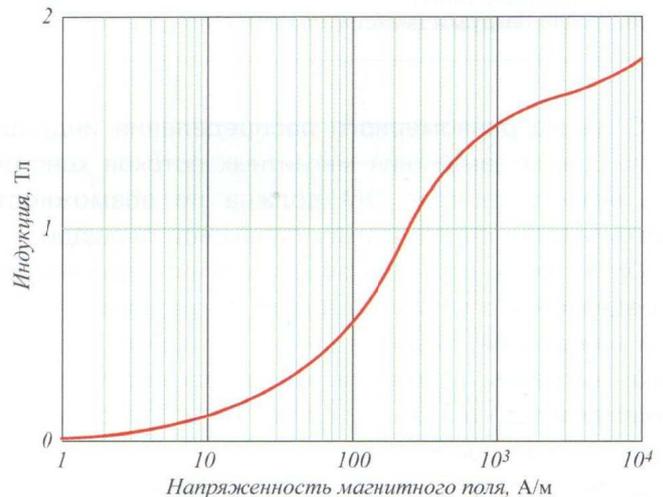


Рис. 3. Основная кривая намагничивания стали Ст.20

- начальный ток левого ЭМ  $I_{10}$ , А;
- начальный ток правого ЭМ  $I_{20}$ , А;
- свойства материалов магнитопровода статора ЭМ и упорного диска в виде основной кривой намагничивания.

Расчет тяговой характеристики осуществляется на основе закона полного тока для контура магнитной цепи с учетом нелинейности кривой намагничивания материала магнитопровода ЭМ. Для примера на рис. 3 приведена основная кривая намагничивания конструкционной стали Ст.20.

Процедура расчета тяговой характеристики предполагает пошаговое решение уравнения, отражающего магнитное состояние магнитопроводов правого и левого электромагнитов при заданных значениях токов в обмотках возбуждения для каждого замкнутого контура магнитного потока. Например, уравнение для одного из контуров левого ЭМ полученное из закона полного тока для магнитной цепи, имеет вид

$$B_1(H_1) = 0,5\mu_0(I_1w - l_s H_s)/\delta_1, \quad (1)$$

где  $B_1(H_1)$  – индукция в зазоре левого ЭМ при токе  $I_1$  в обмотке возбуждения ЭМ;  $w$  – число витков обмотки возбуждения ЭМ;  $l_s$  – длина участка контура магнитного потока в стали магнитопроводов ротора и статора;  $H_s$  – напряженность магнитного потока в магнитопроводе на участке  $l_s$ .

Поиск решения уравнения (1) при заданных значениях тока  $I_1$  осуществляется путем совмещения функции  $B_1(H_1)$  с кривой намагничивания и определения текущего значения напряженности  $H_1$ .

Электромагнитная сила притяжения как результат электромагнитного взаимодействия статора ЭМ и упорного диска, вызванного рассматриваемым контуром магнитного потока, определяется соотношением

$$F_1 = B_1(H_1)^2 S_{cl}/\mu_0$$

где  $S_{cl}$  – сечение участка в зазоре, через который замыкается рассматриваемый магнитный поток.

Расчет результирующей тяговой силы осевого ЭМ двухстороннего действия осуществляется по аналогичным соотношениям для каждого контура магнитных потоков с учетом направления действия сил притяжения.

Результат расчета статических тяговых характеристик на примере двухстороннего осевого ЭМ с Ш-образными зонами притяжения для центробежного компрессора с базовым корпусом №6 приведен на рис. 4.

Анализ тяговой характеристики показывает существенную зависимость линейности тяговой характеристики от величины настройки начальных токов ЭМ ( $I_{10}, I_{20}$ ).

Используя методику расчета тяговой характеристики осевых электромагнитов, можно определить коэффициенты чувствительности осевой опоры к изменению

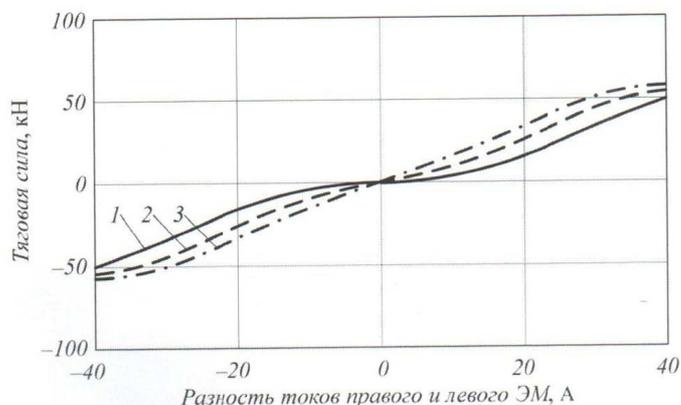


Рис. 4. Статические тяговые характеристики осевого ЭМ двухстороннего действия:  
1 –  $I_{10} = I_{20} = 0$ ; 2 –  $I_{10} = I_{20} = 5$  А; 3 –  $I_{10} = I_{20} = 10$  А

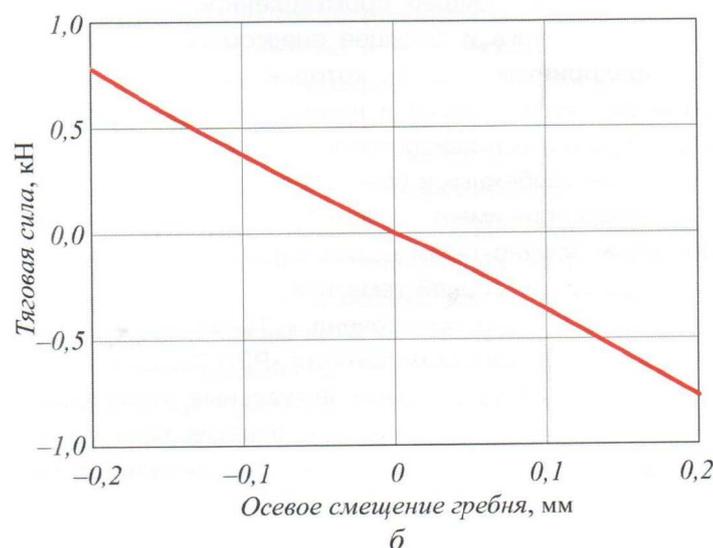
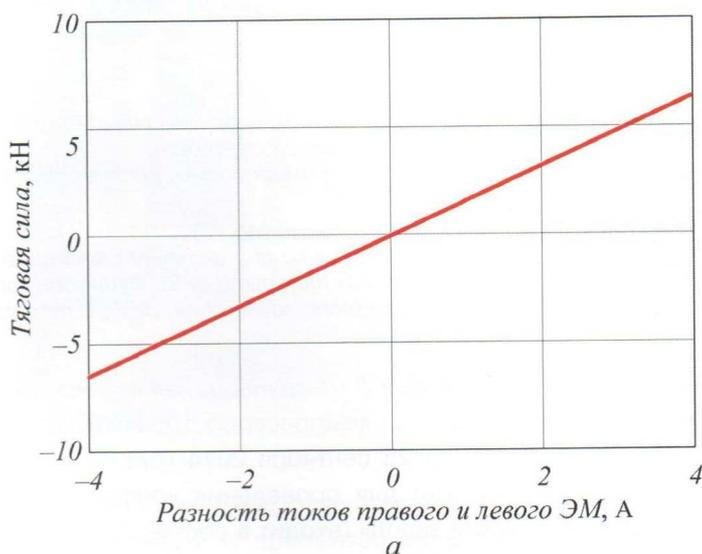


Рис. 5. Графики зависимости тяговой силы осевой опоры двухстороннего действия от изменения токов (а) и зазоров (б) при  $I_{10} = I_{20} = 5$  А;  $F_s = 0$

токов ЭМ и к изменению зазоров при регулировании, которые используются при расчетах динамики роторных систем с АМП.

В качестве примера на рис. 5 приведены графики, отражающие зависимости тяговой силы осевой опоры от изменения токов и от изменения зазоров в ЭМ. Зависимости рассчитаны для двухсторонней осевой опоры с одинаковыми ЭМ, имеющими Ш-образные зоны притяжения, для центробежного компрессора шестой базы с начальными настройками токов электромагнитов  $I_{10} = I_{20} = 5$  А и начальной осевой силы нагрузки  $F_s$ .

#### Список литературы

1. Харитонов А.П., Андрианов А.В., Сусликов Э.В., Ахметзянов А.М. Страхов Г.П. Радиальный электромагнит как элемент системы активного магнитного подвеса//Компрессорная техника и пневматика. 2013. №4.

# Компрессорная Техника и Пневматика

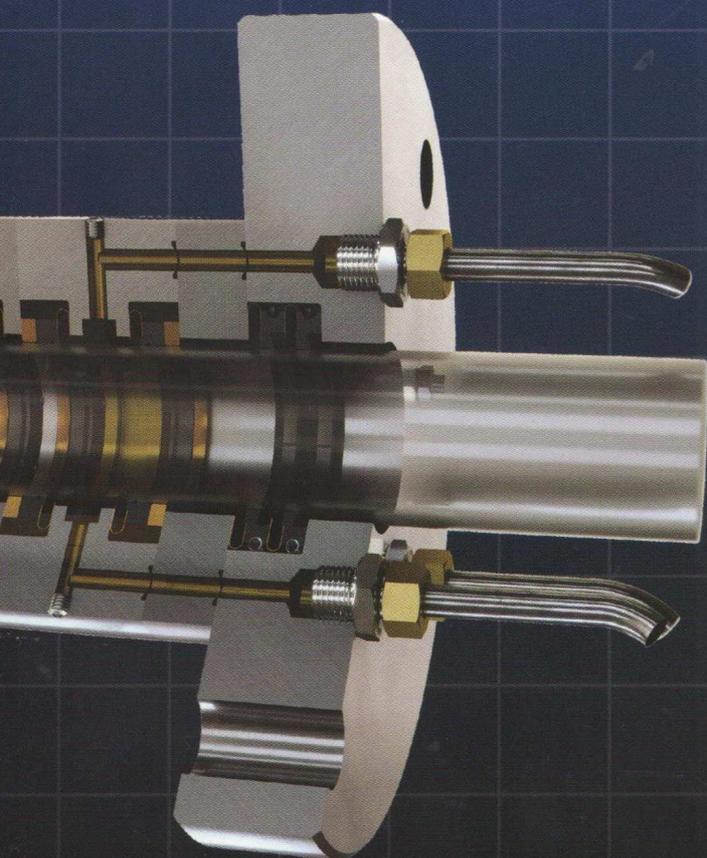


Compressors & Pneumatics

7/ноябрь  
2014

## Газонепроницаемый сальник

штока компрессора



## Нулевая утечка газа

из цилиндра поршневого компрессора

Уникальное решение — сальник XperSEAL — обеспечивает нулевую утечку газа в ходе эксплуатации поршневого компрессора за счет применения масляного затвора.

ООО «ХЁРБИГЕР»

Тел./Факс: +7 495 221 06 78

E-mail: moscow@hoerbiger.com

www.hoerbiger.com



**HOERBIGER**

because performance counts



**Учредители**

Ассоциация компрессорщиков  
и пневматиков  
ООО «Издательство «КХТ»

**Издатель**

ООО «ИИЦ «КХТ»

**Главный редактор**

Галеркин Ю.Б., д.т.н., проф.  
Yu.B. Galerkin, doctor of Engineering  
Science  
yuri\_galerkin@mail.ru

**Зам. главного редактора**

Морозова Э.И.  
E.I. Morozova  
morozova@chemtech.ru

**Научный редактор**

Крузе А.С.

**Редакционная коллегия**

**Амин Хаджу, д.т.н.**  
Amin Haghjoo (Germany),  
PhD Technology Leader  
**Бухолдин Ю.С., канд. техн. наук**  
Bukholdin Yu.S. (Ukraine), cand. of Eng. Sc.  
**Демихов К.Е., д.т.н., проф.**  
Demikhov K.E., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Захаренко В.П., д.т.н., проф.**  
Zakharenko V.P., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Игнатъев Д.К., к.т.н.**  
D.K. Ignatiev (USA), PhD(Eng)  
**Кузнецов Л.Г., д.т.н., проф.**  
Kuznetsov L.G., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Кулагин В.А., д.т.н., проф.**  
Kulagin V.A., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Парафейник В.П., д.т.н., проф.**  
Parafeinik V.P. (Ukraine), d-r of Eng. Sc., prof.  
**Сальников С.Ю., канд. техн. наук**  
Salnikov S.Yu., cand. of Eng. Sc.  
**Сухомлинов И.Я., д.т.н., проф.**  
Sukhomlinov I.Ya., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Хисамеев И.Г., д.т.н., проф.**  
Khisameev I.G., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Цыганков А.В., д.т.н., проф.**  
Tsigankov A.V., d-r of Eng. Sc., prof.  
**Шайхутдинов А.З., канд. техн. наук**  
Shaikhutdinov A.Z., cand. of Eng. Sc.  
**Ян Крысинский, д.т.н., проф.**  
Jan Krysiniski (Poland), D.Sc., PhD, D.h.c.  
mult  
**Ян Кеннет Смит, д.т.н., проф.**  
Jan Kenneth Smith (UK), B.Sc(Eng), DIC, PhD

**Дизайн и компьютерная верстка**

Япин О.Ю.

**Адрес редакции**

107258, Москва,  
ул. 1-я Бухвостова, 12/11, корп. 17,  
ИИЦ «КХТ»  
Для почты: 107061, Москва, п/о 061, а/я 547,  
ИИЦ «КХТ»  
Тел./факс: (495) 223-66-35  
E-mail: info@chemtech.ru  
www.compressortech.ru

**Журнал входит в перечень ВАК РФ**

Юридическую ответственность  
за достоверность рекламы  
несут рекламодатели.  
Полная или частичная перепечатка  
материалов допускается только  
с письменного разрешения редакции.

© «Компрессорная техника и пневматика», 1991

Сдано в набор 20.9.2014.  
Подписано в печать 10.10.2014.  
Формат 60×90/8. Печать офсетная.  
Усл.-печ.л. 5,0. Зак. 1395

Отпечатано в ООО «АМА-пресс»,  
111116, Москва., Зельев пер., 3

# Компрессорная Техника и Пневматика

Compressors & Pneumatics

7/ноябрь  
2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### Механика

- Кузнецов Л.Г.** ОАО «Компрессор» – производитель оборудования для передовых технологий  
*L.G. Kuznetsov. JSC «Compressor» – manufacturer of equipment for advanced technologies . . . . . 3*
- Линднер-Сильвестер Т., Холд К.** Сальник для цилиндров поршневых компрессоров, обеспечивающий нулевую утечку газа  
*T. Lindner-Silwester, Ch. Hold. True zero-emission packing for reciprocating compressors . . . . . 7*

### Эксплуатация

- Соломатин С.Я., Краевский В.Н., Черкащенко А.С.**  
Проактивное обслуживание турбин 103JT аммиачного производства ОПЗ  
*S.Ya.Solomatina, V.N.Kraevskiy, A.S. Cherkaschenko. Proactive maintenance of turbines 103JT of ammoniac production of OPZ . . . . . 14*
- Микаэлян Э.А., Седов В.В.** Определение характеристик газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций и газопровода в условиях эксплуатации  
*E.A. Mikaelyan, Gubkin, V.V. Sedov. Definitions of characteristics of gas-turbine distributing units of stations, gas pipe under operating conditions . . . . . 20*

### Расчет и конструирование

- Сарманаева А.Ф., Мустафин Т.Н., Чекушкин Г.Н.**  
Анализ методов расчета и работы самодействующих кольцевых клапанов поршневых компрессоров  
*A.F. Sarmanaeva, T.N.Mustafin, G.N.Chekoushkin. Analytical treatment of design methods and operation of self-acting ring valves of piston compressors . . . . . 26*
- Соколов Н.В., Хадиев М.Б., Максимов Т.В., Футин В.А.**  
Испытания упорного подшипника скольжения с параллельным межподушечному каналу скосом в центробежном компрессоре  
*N.V. Sokolov, M.B. Khadiev, T.V. Maksimov, V.A. Futin. Testing of the thrust plain bearing with the skew parallel to the passage between pads in centrifugal compressor . . . . . 30*
- Хапов Д.А., Чистяков А.О., Москалев И.Н.**  
Инженерный расчет факторов сжимаемости газов в области умеренных давлений и температур, удаленных от критических  
*D.A. Khapov, A.O. Chistyakov, I.N. Moskalev. The engineering calculation of the compressibility factors of gases at moderate pressures and temperatures . . . . . 37*
- Андрианов А.В., Сусликов Э.В., Страхов Г.П., Ахметзянов А.М., Харитонов А.П.** Осевой электромагнит как элемент системы активного магнитного подвеса  
*A.V. Andrianov, E.V. Suslikov, G.P. Strakhov, A.M. Ahmetzjanov, A.P. Kharitonov. Axial electromagnet as an element of active magnetic suspension system . . . . . 42*

### Выставки, конференции

- Конференция по компрессоростроению  
*Conference on compressors engineering . . . . . 46*

### Поздравляем с юбилеем!

- Василию Евгеньевичу Евдокимову 75 лет . . . . . 48