

## Об опыте эксплуатации поршневых компрессоров под контролем систем вибродиагностического мониторинга

В.Н. Костюков, А.П. Науменко (ООО «НПЦ «Динамика»), А.П. Дударенко (ООО «КСК-Сервис»)

*В статье представлены результаты эксплуатации поршневых компрессоров (ПК) под контролем систем вибродиагностического мониторинга, рассмотрены вопросы использования клапанов ПК различных производителей и их влияние на виброактивность компрессоров. Адекватную оценку виброактивности поршневых машин обеспечивает существующая в России нормативная база по параметрам вибрации.*

*Представлены принципиальные отличия российской и международной методологий для оценки состояния ПК, в частности, используемый для этих исследований диапазон частот. Показано, что подход, заложенный в Российских стандартах по нормам вибрации ПК, обеспечивает оценку технического состояния узлов и деталей ПК, соответствующую реальности.*

*Приведенные примеры подтверждают, что критерием оценки правильности ремонтов ПК должно являться техническое состояние оборудования, в том числе и его виброактивность, а не «бездумное» использование новых комплектующих, приобретаемых у мировых «брендов». На практических примерах эксплуатации и мониторинга ПК показано, что отечественные разработки и продукция, в частности, научно-методическая и нормативная база вибродиагностического мониторинга, системы мониторинга ПК, клапаны ПК, не уступают импортным, а зачастую и превосходят их по параметрам и характеристикам, что является положительным фактором в условиях сложившейся экономической ситуации и политики импортозамещения.*

**Ключевые слова:** поршневой компрессор, клапан, вибрация, мониторинг, диагностика, техническое состояние.

### **About the Experience in the Operation of Reciprocating Compressors under Control of the Vibration Monitoring System V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko (DYNAMICS SPC, Ltd.), A.P. Dudarenko (LLC KSK-Service)**

*The article presents the results of reciprocating compressors operation under the control of Vibration-Based Diagnostics monitoring systems, dwells upon the issues of usage of reciprocating compressors valves by various vendors and their influence on compressors' vibroactivity. An adequate evaluation of vibra-activity of piston machines is provided by the Russian regulative database on vibration parameters.*

*Main differences of Russian and global methods of reciprocating compressors health evaluation, particularly, used frequency range, are presented in the article. It is shown that the approach laid in Russian standards on reciprocating compressors vibration regulations, ensures true-to-life assessment of reciprocating compressors assemblies and details condition.*

*The examples given in the article confirm that the criteria of reciprocating compressors repair correctness assessment should be the machinery health, including its vibroactivity, not just mindless usage of new components purchased from the global brands. Practical examples of operation and monitoring of reciprocating compressors show that Russian developments and products, particularly, scientific-methodological and standards base of Vibration-Based Diagnostics monitoring, reciprocating compressors monitoring systems, reciprocating compressors valves are highly competitive with foreign ones, and sometimes even superior to them in parameters and characteristics, which is a positive factor under the conditions of current economic situation and import substitution policy.*

**Keywords:** reciprocating compressors, valve, vibration, monitoring, diagnostics, condition.

Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация оборудования опасных производств, в частности поршневых компрессоров (ПК), невозможна без мониторинга их состояния в реальном времени. Основным параметром, позволяющим адекватно и достоверно оценить состояние структурных параметров механизмов, является вибрация [1]. До недавнего времени процедура оценки состояния ПК по параметрам вибрации являлась весьма сложной задачей, поскольку ни в России, ни за рубежом не существовало соответствующей нормативно-методической базы. Стандарты ISO 10816-5–1995, недавно введенный ISO 10816-8–2014, а также API-618 не обеспечивали и до сих пор не обеспечивают оценки вибрационного состояния поршневых машин [2], соответствующей реальности. И только с введением ГОСТ Р 56233–2014 [3] в России появились нормы вибрации, позволяющие не только проводить достоверный и адекватный контроль вибросостояния ПК, но и осуществлять мониторинг технического состояния поршневых машин. При этом с 2011 г. в России использовался отраслевой стандарт [4], являющийся прототипом национального стандарта [3], нормативные значения вибропараметров в котором, а так-

же методология контроля состояния ПК по параметрам вибрации явились результатом более чем 20-летнего опыта вибродиагностического мониторинга десятков поршневых машин [5].

Внедрение систем мониторинга ПК и выбор узлов для контроля состояния основывается на статистике отказов узлов и деталей. Анализ результатов опроса потребителей и производителей ПК из таких стран, как США, Канада, Великобритания, Франция, Бельгия, Норвегия, Кувейт, Сингапур, Китай, ОАЭ, позволил выявить системы и составные части компрессоров, а также доли отказов, которые приводят к незапланированным ремонтам [6, 7].

Результаты опроса [7] показали, что пять систем и составных частей компрессоров являются причиной около 76,5% всех незапланированных остановов компрессоров. При этом доля отказов клапанов составляет 36%, а стоимость их ремонта – 50% общих затрат на ремонт компрессора.

Анализ распределения причин отказов поршневых компрессоров [6, 7] позволил установить, что одной из основных причин отказов машин и, в первую очередь, кла-

панов является перегрузка, которая возникает в результате изменений физико-химического состояния газа в процессе компримирования. Особенно ярко это видно на примере компрессоров, сжимающих водородсодержащий газ.

По данным работ [7, 9], в результате поломок клапанов (главным образом пластин) происходит до 70–90% остановок шахтных и заводских компрессорных установок. Для компрессоров типа 5Г-100/8, 4М10-100/8 доля отказов клапанов может достигать 50% общего числа ремонтируемых узлов ПК [7, 8].

Результаты статистического анализа данных по ремонтам ПК и данных систем мониторинга компрессоров, которые получены на одном из нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) России, представлены в таблице [9].

Таблица 1  
Отказы по типам узлов, механизмов, деталей ПК

Узлы и причины ремонта	Соотношение по типам, %		
	НПЗ РФ [9]	Данные работы [6]	
Ремонт и замена клапанов	36,4	36	
Ремонт и замена деталей ЦПГ, в том числе:			
	сальников под давлением	17,5	17,8
	колец	25,8	13,9
прочих деталей	5,0	Нет данных	
Ремонт и замена деталей КПМ	3,8	32,3	
Ремонт и замена деталей КШМ	4,0		
Другие ремонты	7,5		
Всего ремонтов, единиц	772	Нет данных	

Результаты показывают, что статистика отказов клапанов и сальников [9] совпадает с данными исследований [6, 7]. Однако существенный процент (более 30%) неисправностей приходится на узлы и детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), при этом отказ колец составляет более 25% (по данным работ [6, 7] – 14%). Кроме того, весьма значимым является отказ деталей кривошипно-ползунного (КПМ) и кривошипно-шатунного механизмов (КШМ).

Современные тенденции, направленные на снижение затрат на проектирование и изготовление отдельных

составляющих сложных технических систем, привели, с одной стороны, к разработке типовых и жестких технологий проектирования и производства, а с другой – существенно усложнили использование оборудования в конкретных условиях эксплуатации. Одной из проблем на современных технологических установках нефтегазохимических комплексов (НХК) является обеспечение качественными запасными частями и расходными материалами, к которым относятся, в частности, подшипники качения, клапаны поршневых компрессоров и др. Повсеместно стало практикой, что «родные» комплектующие работают долго и надежно, отрабатывая свой назначенный ресурс.

Установка новых клапанов на поршневые компрессоры, как правило, приводит к изменению их технического состояния, в частности изменяется виброактивность машины. Чаще всего это связано с установкой клапанов, параметры которых не соответствуют реальным условиям компримирования.

Опыт эксплуатации систем мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени [11] показывает, что в большинстве случаев требуются настройка и регулировка клапанов под конкретные условия их использования [10].

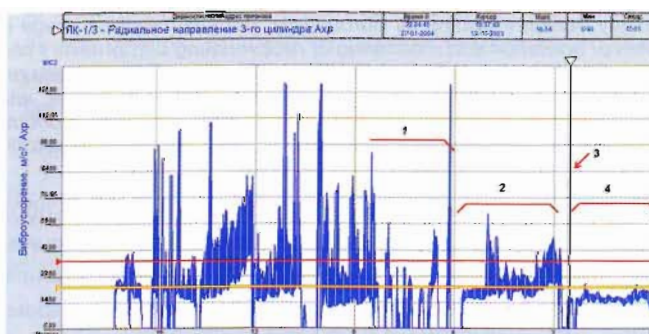


Рис. 1. Тренд вибрации цилиндра в зоне расположения клапанов компрессора типа 4М16М-35/45-55

Тренды вибропараметров системы мониторинга состояния поршневых компрессоров типа 4М16М-35/45-55 (рис. 1, участок 1 – за 10 мес. эксплуатации до замены клапанов) имеют большое количество выбросов, что свидетельствует о частом повышении уровня вибрации, являющемся следствием появления неисправностей клапанов и разрушения их деталей. Если судить по трендам, то оказывается, что обслуживающий и ремонтный персонал непрерывно производил замену клапанов на данном цилиндре, при этом реально максимальное время работы конкретного клапана составляло всего лишь несколько рабочих смен.

Почти 5 мес. клапаны на одном из компрессоров эксплуатировались с заводскими регулировками (см. рис. 1, участок 2). За это время было заменено 17 клапанов.

После ревизии и замены пружин на всех клапанах, их регулировки за примерно четыре месяца до окончания наблюдения (см. рис. 1, участок 3) уровень вибрации существенно снизился и стал меньше предупредительного уровня. Разрушения клапанов прекратились (см. рис. 1, участок 4). За счет изменения высоты поднятия пластин был изменен параметр время–сечение, что привело к существенному снижению виброактивности клапанов.

Аналогичная проблема возникла при эксплуатации циркуляционного поршневого компрессора типа 2ГМ2,5–6,2/38–46С водородсодержащего газа гидроочистки на установке «Изомеризация».

Конструктивное исполнение компрессора – поршневой, горизонтальный, одноступенчатый на оппозитной базе 2М2,5 без смазки цилиндров и сальников. Приводом служит электродвигатель с частотой вращения 750 мин.<sup>-1</sup>. Компрессор поставлялся с клапанами типа ВКТ и НКТ. В период эксплуатации компрессоров с «родными» клапанами повышение виброактивности машин происходило только при изменении и нарушении технологического режима компримирования.

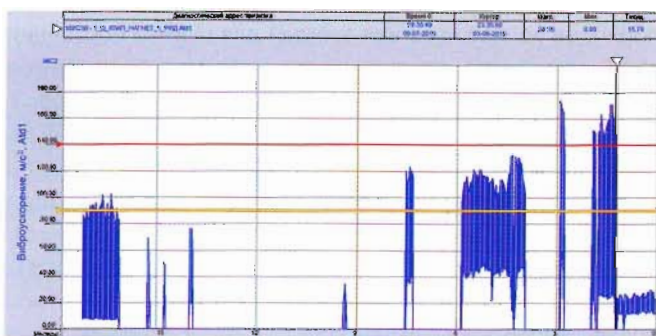


Рис. 2. Тренд вибрации на нагнетательном клапане 1-го цилиндра 1-го ряда до замены клапанов компрессора типа 2ГМ2,5–6,2/38–46С (курсор установлен на дату замены клапанов: 03.06.2015)

В то же время попытки использования клапанов различных производителей и конструкций приводила к существенному повышению виброактивности компрессора (рис. 2) до недопустимых уровней, определенных нормами вибрации [3]. Одной из проблем применения не «родных» клапанов для компрессоров различных типов является нерасчетный режим работы для конкретного состава газа. При этом, как правило, нарушается такой параметр как время–сечение, определяющий пропускную способность клапана. В этом случае появляется турбулентное течение газа в полостях компрессора после клапана и его пульсации, что приводит к возникновению значительных по мощности виброакустических колебательных процессов.

Подбор клапана с оптимальным параметром время–сечение для конкретного компрессора, комприми-

рующего конкретный по составу газ, является достаточно серьезной проблемой для многих эксплуатирующих организаций. Это связано с тем, что производитель клапанов должен осуществлять расчет и изготовление клапанов фактически под конкретный экземпляр машины для данных условий ее эксплуатации. А это практически всегда является экономически не выгодным мероприятием. «Брендовым» изготовителям клапанов проще иметь на складах клапаны с усредненными характеристиками и поставлять их по тем опросным листам, которые фактически учитывают усредненные свойства компримируемых газов, не принимая во внимание их газодинамику в конкретных условиях компримирования.

Специальные исследования в области течения газов через клапаны позволили найти решения, позволяющие формировать потоки газа и управлять их течением. Специалистам ООО «КСК-Сервис» удалось реализовать это при разработке конструкции тарельчатого беспружинного клапана. Хорошо обтекаемая сферическая поверхность запорных тарелок обеспечивает ламинарное течение газа через клапан, что значительно увеличивает его ресурс работы и улучшает виброакустические характеристики клапана [12].

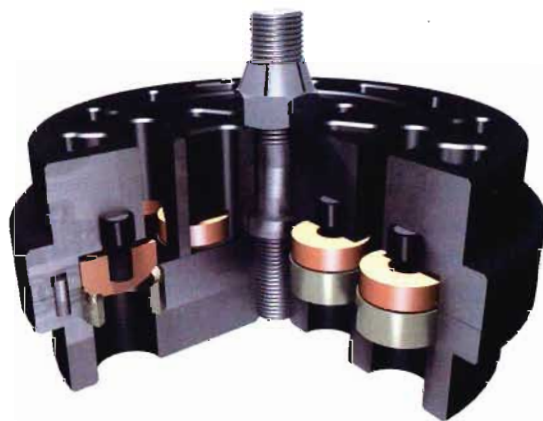


Рис. 3. Клапан с низкой виброактивностью, разработанный специалистами ООО «КСК-Сервис»

Опытные экземпляры таких клапанов (рис. 3) в июне 2015 г. были установлены на первый цилиндр компрессора типа 2ГМ2,5–6,2/38–46С технологической позиции 100С1В. При этом на втором цилиндре были установлены клапаны другого производителя. В результате после пуска машины значения некоторых контролируемых параметров на первом цилиндре снизились почти в 10 раз (рис. 4), что существенно сказалось на общей виброактивности компрессора. В то же время значения вибропараметров на втором цилиндре, расположенном оппозитно к первому, практически не изменились (см. рис. 4, тренд параметра «Цилиндр 2»).

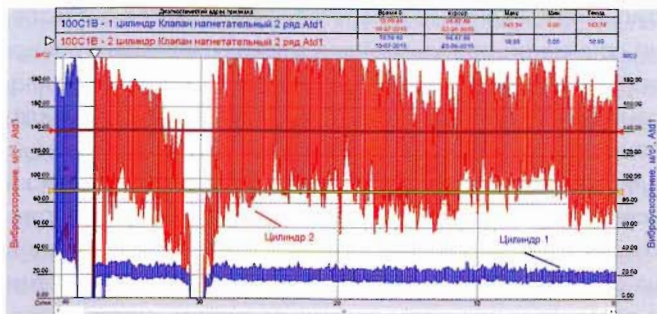


Рис. 4. Тренды вибрации на нагнетательных клапанах 1-го (новые клапаны) и 2-го (старые клапаны) цилиндров 2-го ряда

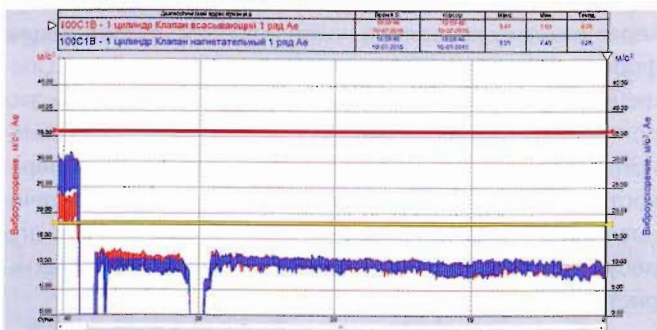


Рис. 5. Тренды вибрации (СКЗ виброускорения) на всасывающем и нагнетательном клапанах 1-го цилиндра 1-го ряда после замены клапанов

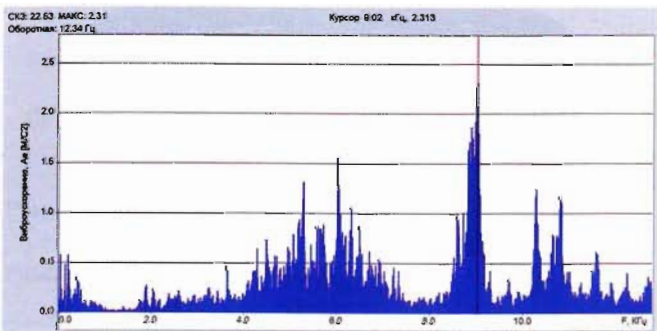


Рис. 6. Спектр вибрации неоптимального клапана для данного компрессора и технологического режима

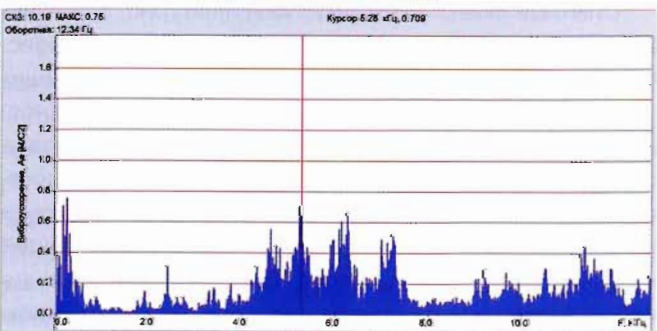


Рис. 7. Спектр вибрации клапана, правильно подобранного под режим компримирования

Тренды вибропараметров [среднего квадратического значения (СКЗ) виброускорения] показывают, что интегрально виброактивность всасывающих и нагнетательных клапанов снизилась в почти 3 раза (рис. 5).

Причины виброактивности показывают спектры вибрации клапанов (рис. 6, 7). Клапаны с не оптимальным для данного газа и процесса компримирования параметром время–сечение являются источником высокочастотной вибрации, большая часть энергии колебаний которой сосредоточена в диапазоне от 8 до 10 кГц (рис. 6). В то же время правильно подобранный под существующий режим компримирования клапан является источником практически «розового» шума без ярко выраженных резонансов (рис. 7).

Следует заметить, что состояние клапана, спектр которого представлен на рис. 6, система вибродиагностического мониторинга [7, 9, 10, 11] признала недопустимым согласно нормативным документам РФ [3, 4]. В то же время согласно ISO 10816-8–2014, API-618 этот клапан был бы признан годным к эксплуатации. Принципиальным отличием методологии оценки состояния ПК, заложенной в документах [3, 4], от других известных подходов является используемый для оценки состояния диапазон частот: во всем мире вибрация измеряется в диапазоне до 1 кГц. Но, как видно из рис. 5, 6, верхняя частота диапазона измеряемых частот должна быть увеличена как минимум в 10 раз. Именно такой подход заложен в российские стандарты по нормам вибрации ПК [3, 4], что обеспечивает оценку технического состояния узлов и деталей ПК, соответствующую реальности.

Таким образом, использование в России адекватной нормативно-методической базы [2–5], обеспечивающей вибродиагностический мониторинг поршневых компрессоров, а также передовых разработок в области мониторинга технического состояния оборудования в реальном времени и методологии вибродиагностического мониторинга ПК [7, 9, 10, 11] позволили реализовать технологию безопасной ресурсосберегающей эксплуатации поршневых компрессоров опасных производств. При этом у эксплуатирующего персонала появилась возможность проводить ремонт по фактическому техническому состоянию и использовать запасные части и комплектующие, которые обеспечивают низкую виброактивность машин, что в свою очередь позволяет увеличить ресурс машинного оборудования.

Приведенные примеры показывают, что критерием оценки правильности ремонтов должно являться техническое состояние оборудования, в том числе и его виброактивность, а не «бездумное» использование новых комплектующих, приобретаемых у мировых «брендов». Из практических примеров эксплуатации и мониторинга ПК видно, что отечественные разработки и продукция

не уступают импортным, а зачастую и превосходят их по параметрам и характеристикам, что является положительным фактором в условиях сложившейся экономической ситуации и политики импортозамещения.

#### Список литературы

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. 2-е изд., с уточн. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 378 с.

2. Науменко А.П. Нормативно-методическое обеспечение вибродиагностического мониторинга поршневых компрессоров//Химическая техника. 2015. №11. С. 18–20.

3. ГОСТ Р 56233–2014. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация стационарных поршневых компрессоров. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2015. 19 с.

4. СТО 03-007–11. Мониторинг оборудования опасных производств. Стационарные поршневые компрессорные установки опасных производств: эксплуатационные нормы вибрации. М.: Изд-во «КХТ», 2011. 18 с.

5. Науменко А.П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени. Дис. ... д-ра техн. наук. Омск: ОмГТУ, 2012. 423 с.

6. Leonard S.M. Increasing the Reliability of Reciprocating Compressors on Hydrogen Services//National Petroleum Refiners Association Maintenance Conference. New Orleans, LA, 1997.

7. Костюков В.Н., Науменко А.П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров//Компрессорная техника и пневматика. 2008. №3. С. 21–28.

8. Дмитриев В.Т. Повышение надежности поршневых компрессоров//Компрессорная техника и пневматика. 2005. №6. С. 8–9.

9. Науменко А.П. Современные методы и средства real-time мониторинга технического состояния поршневых машин//Компрессорная техника и пневматика. 2010. №8. С. 27–34.

10. Костюков В.Н., Науменко А.П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин//Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. №3. С. 27–36.

11. Костюков В.Н., Науменко А.П. Разработка и внедрение систем диагностики и мониторинга поршневых компрессоров//Компрессорная техника и пневматика. 2011. №5. С. 31–36.

12. Дударенко А.П. Способ повышения надежности работы компрессора за счет применения новейших разработок самодействующих клапанов//Современные концепции выбора и технического обслуживания компрессорного оборудования на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях. Материалы семинара. М.: ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2013. С. 84–86.

Актуальные задачи противокоррозионной защиты и промышленной безопасности, новейшие технологии и материалы огнезащиты, изоляции, восстановления, усиления и антикоррозионной защиты строительных конструкций зданий и сооружений, мостов, газоходов, трубопроводов и технологического оборудования предприятий нефтегазовой отрасли, энергетики, металлургии и других отраслей.



СЕДЬМАЯ МЕЖОТРАСЛЕВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

## «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА-2016»

30 марта 2016 г., Москва, ГК ИЗМАЙЛОВО

Защита от коррозии

Огнезащита и изоляция

Новейшие ЛКМ

В работе предыдущих конференций «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА - 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015» приняли участие сотни делегатов от компаний различных отраслей: руководители предприятий энергетики, металлургии, цементной, нефтегазовой и химической отраслей промышленности, главные инженеры, главные механики, главные энергетики, начальники подразделений, ответственных за промышленную безопасность, защиту от коррозии, реконструкцию и капитальное строительство; ведущие специалисты инжиниринговых и проектных организаций, занимающихся противокоррозионной защитой; руководители, технологи и эксперты компаний-производителей красок и лакокрасочных материалов, различных типов покрытий для защиты от коррозии, огнезащиты, изоляции, усиления и восстановления зданий, сооружений и оборудования.

Сборники предыдущих конференций и подробную информацию см. на сайте [www.intecheco.ru](http://www.intecheco.ru)  
[www.intecheco.ru](http://www.intecheco.ru), тел.: (905) 567-8767, факс: (495) 737-7079, [admin@intecheco.ru](mailto:admin@intecheco.ru)

# Компрессорная Техника и Пневматика



Compressors & Pneumatics

1/февраль  
2016



**PCVEXPO**



15-я Юбилейная международная выставка  
«Насосы. Компрессоры. Арматура.  
Приводы и двигатели»



[www.pcvexpo.ru](http://www.pcvexpo.ru)

Организаторы



Спонсор



**25-27 октября 2016 года**  
Москва, МВЦ «Крокус Экспо»



# Компрессорная Техника и Пневматика

Compressors & Pneumatics

1/февраль  
2016

## СОДЕРЖАНИЕ

### Механика

**Кузнецов Ю.Л.** Возможности АО «Компрессор» и ООО «Компрессор Газ» по импортозамещению на рынке компрессорного оборудования Y.L. Kuznetsov. Opportunities of «Compressor» JSC and «Compressor Gaz» LLC for import substitution on the market of the compressor equipment . . . . . 2

**Соколовский М.И., Ерышкин Ю.П., Селянская Е.Л., Касьянов С.В., Макаров А.А.** Компрессорное оборудование серии «Урал» для предприятий дожимного комплекса M.I. Sokolovsky, Yu.P. Eryshkin, E.L. Selyanskaya, S.V. Kasyanov, A.A. Makarov. Compressor Equipment of the Ural Series for Booster Compressor Stations . . . . . 6

### Расчет и конструирование

**Коршунов А.В., Клейманов Р.В.** Настройка моделей турбулентности для расчета диффузорных течений A.V. Korshunov, R.V. Kleimanov. Tuning of Turbulence Models for Diffuser's Flow Modeling . . . . . 16

**Бронштейн М.Д., Райков А.А., Бурмистров А.В., Веселова Л.В., Саликеев С.И.** Моделирование геометрии спиралей по экспериментальным измерениям координат M.D. Bronsteyn, A.A. Raykov, A.V. Burmistrov, L.V. Veselova, S.I. Salikeev. Scroll Geometry Modeling According to Coordinates Experimental Measurement . . . . . 19

**Галеркин Ю.Б., Солдатова К.В.** Принципы моделирования напорной характеристики центробежного рабочего колеса Y.B. Galerkin, K.V. Soldatova. Loading Factor Performance of a Centrifugal Compressor Impeller. Specific Features and Way of Modeling . . . . . 24

### Теория и методы испытаний

**Соколовский М.И., Ерышкин Ю.П., Селянская Е.Л., Касьянов С.В., Чусов А.М., Голдобин А.С., Карпин М.Ю.** Проблемные вопросы испытаний центробежных компрессоров на заводском стенде с открытым контуром. Часть 3 M.I. Sokolovskiy, Yu.P. Yeryshkin, E.L. Selyanskaya, S.V. Kasiyanov, A.M. Chusov, A.S. Goldobin, M.Yu. Karpin. Problems During Centrifugal Compressor Testing at the Shop Bench with Open Loop System. Part 3 . . . . . 34

### Диагностика, автоматическое управление и регулирование

**Костюков В.Н., Науменко А.П., Дударенко А.П.** Об опыте эксплуатации поршневых компрессоров под контролем систем вибродиагностического мониторинга V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko, A.P. Dudarenko. About the Experience in the Operation of Reciprocating Compressors under Control of the Vibration Monitoring System . . . . . 39

### Методы проектирования

**Котлов А.А., Хрусталева Б.С.** Концепция создания системы автоматизированного проектирования поршневых компрессоров A.A. Kotlov, B.S. Khrustaleva. The Concept of Creating a Computer-aided Design of Reciprocating Compressors . . . . . 44

### Поздравляем с юбилеем!

Юрию Сергеевичу Бухолдину 60 лет  
Yuri Bouholdin is 60 . . . . . 48