

УДК 621.512

А.В. Смирнов, В.Н. Фесенко, С.В. Коротенко, П.К. Попельнух, А.В. Шаповалов
 ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», ул. Горького, 58, г. Сумы, Украина, 40004
 e-mail: smpo@frunze.com.ua

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ДЛЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ДРУГИХ ГАЗОВ

Поршневые компрессоры находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Потребители компрессоров постоянно повышают требования к уровню их характеристик, среди которых основными являются энергетическая эффективность и надёжность. Высокие значения этих характеристик особенно трудно обеспечить, если компрессоры создаются на основе бесшмазочных уплотнений. Излагаются результаты работ по созданию нового поколения самодействующих клапанов цилиндров для ступеней низкого, среднего и высокого давлений компрессора 4GM16-100/200M1. Разработка клапанов проведена на основе математической модели, надёжность которой подтвердили экспериментальные исследования. Рассматриваются охлаждаемые конструкции уплотнений штоков компрессора. В клапанах и уплотнениях применены высокопрочные полимерные материалы. Внедрение эффективных клапанов и бесшмазочных уплотнений позволит создавать компрессоры с высокой производительностью и одновременным снижением на 5-10 % потребляемой мощности.

Ключевые слова: Поршневой компрессор. Диоксид углерода. Самодействующий клапан. Уплотнение. Смазка. Эффективность. Надёжность.

A.V. Smirnov, V.N. Fesenko, S.V. Korotenko, P.K. Popelnukh, A.V. Shapovalov

DIRECTIONS OF PERFECTION OF PISTON COMPRESSORS FOR CARBON DIOXIDE AND OTHER GASES

Piston compressors find wide application in various industries. Consumers of compressors constantly raise requirements to level of their characteristics among which the cores are power efficiency and reliability. It is especially difficult to provide high values of these characteristics, if compressors are created on a basis without lubrication packings. Results of works on creation of new generation of automatic valves for cylinder stages of low, medium and high-pressure compressor 4GM16-100/200M1 are stated. Development of valves made based on a mathematical model, which reliability was confirmed with experimental researches. The design of cooled compressor rod packing is considered. In the valves and packings used high-strength polymer, materials are applied. Introduction of effective valves and without lubrication packings will allow creating compressors with high efficiency and simultaneous decrease on 5-10 % of power consumption.

Keywords: Piston compressor. Carbon dioxide. Automatic valve. Packing. Lubrication. Efficiency. Reliability.

1. ВВЕДЕНИЕ

Диоксид углерода, сжатый до давления 150-200 кгс/см², используется в производствах такой востребованной продукции, как карбамид. ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» в 70-80-ых гг. прошлого столетия поставило для производств карбамида более 40 компрессорных установок, обеспечивающих сжатие диоксида углерода до указанных давлений.

Предприятие уделяет внимание постоянному совершенствованию компрессорных установок данного типа. Одним из важнейших направлений является

создание нового поколения самодействующих клапанов цилиндров и современных конструкций уплотнений штоков, поршневых и опорно-направляющих колец, соответствующих по уровню надёжности и эффективности лучшим зарубежным аналогам. Для их изготовления используются высокопрочные полимерные материалы отечественного и зарубежного производства. Применение таких клапанов и уплотнений в агрегатах, сжимающих различные технические газы, в том числе и диоксид углерода, позволяет повысить надёжность и безопасность компрессорного оборудования, увеличить эффективность его использования, а

также снизить потребляемую мощность при компримировании газов.

Настоящая статья подводит итоги определённого этапа работ по созданию ряда конструкций самодействующих клапанов и уплотнений для поршневых компрессоров, выпускаемых предприятием.

2. КОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКИ 4ГМ16-100/200 И 4ГМ16-100/200М1 ДЛЯ СЖАТИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Компрессорные установки (КУ) 4ГМ16-100/200 и 4ГМ16-100/200М1 предназначены для сжатия CO_2 в технологических процессах производства карбамида. Указанные КУ, изготовленные нашим предприятием, поставлялись на заводы химической промышленности, где их эксплуатируют до настоящего времени (см. фото 1).



Фото 1. Компрессорные установки 4ГМ16-100/200М1 в линии производства карбамида на ОАО «Гродноазот» (Республика Беларусь)

Конструктивное исполнение компрессоров — поршневые горизонтальные, пятиступенчатые на опозитной базе 4М16. Приводом служит синхронный электродвигатель. Смазка механизма движения — циркуляционная; охлаждение — водяное. Автоматизированная система контроля, управления и защиты обеспечивает дистанционный программный пуск и остановку компрессора.

Технические характеристики установок приводятся в табл. 1.

3. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК

Экономические условия, в которых сегодня работают предприятия, объективно определяются как уровнем развития промышленности в целом, так и уровнем производства, энергопотребления, технологий машиностроения, качества и надёжности выпускаемого оборудования. Это диктует необходимость нового подхода к развитию отрасли компрессоростроения, где без постоянного поиска эффективных решений, проведения научно-исследовательских работ, внедрения передовых технологий и производственно-

го оборудования невозможно создать конкурентоспособную продукцию.

Поэтому отделом поршневых машин СКБ реализуется программа по внедрению надёжных, современных и высокоэффективных самодействующих клапанов и уплотнений. Результаты проведённых работ рассмотрим более детально.

3.1. Современные самодействующие клапаны для углекислотных поршневых компрессоров 4ГМ16-100/200М1

При проектировании и создании новых клапанов учитывались основные критерии, которым они должны соответствовать: высокая надёжность (срок безотказной эксплуатации не менее 8000 ч) и высокая эффективность при минимальном сопротивлении компримируемой среде [1-4].

Клапаны самодействующие дисковые предназначены для проектируемых, изготавливаемых и находящихся в эксплуатации углекислотных газовых поршневых компрессоров 4ГМ16-100/200М1 с частотой вращения коленчатого вала до $6,25 \text{ с}^{-1}$ (375 об/мин) и средней скоростью поршня до 4 м/с.

Основные технические характеристики данных клапанов приведены в табл. 2 и соответствуют рисункам 2 и 3 для каждой ступени компрессора.

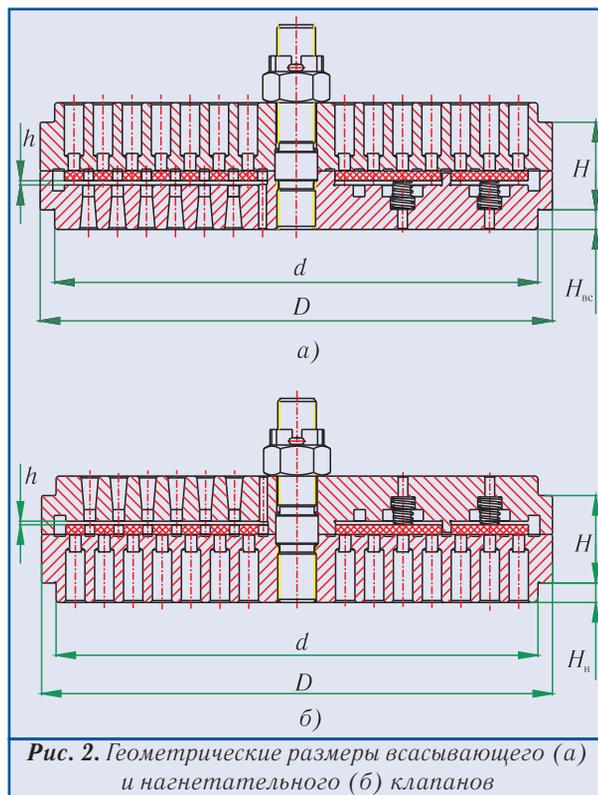


Рис. 2. Геометрические размеры всасывающего (а) и нагнетательного (б) клапанов

Клапаны комплектовались запорными элементами из конструкционных высокопрочных полимерных материалов и высококачественными пружинами сжатия. Клапаны предназначены для эксплуатации в условиях нормальной, ограниченной смазки и в бессмазочном режиме работы цилиндропоршневой группы.

Основные отличительные особенности этой

Таблица 1. Характеристики компрессорных установок 4М16-100/200 и 4ГМ16-100/200М1

Параметры	Значения
Производительность, приведённая к условиям всасывания, м ³ /мин	101,4±5,07
Давление начальное, ном., кгс/см ²	1,01
Давление конечное, ном., кгс/см ²	200
Температура газа начальная, °С	30
Температура газа конечная, °С	150
Частота вращения вала компрессора, об/мин	375
Средняя скорость поршня, м/с	4
Потребляемая мощность при номинальной производительности и давлении, кВт	1130±56
Изотермная мощность, кВт	884,13
Изотермный КПД	0,782
Диаметры цилиндров компрессора, мм:	
– I ступень	880
– II ступень	500
– III ступень	280
– IV-V ступени	200 и 100
Диаметры штоков компрессора, мм	80
Ход поршня компрессора, мм	320
Привод компрессора — электродвигатель СДКП-2-18-41-16	1250 кВт, 6000 В, 375 об/мин
Масса установки без электродвигателя, кг	80740
Применяемые масла:	
– для смазки цилиндров и уплотнений штоков	Компрессорное К19 Индустриальные И45А, И50А
– для системы циркуляционной смазки	

конструкции: надёжность, высокая пропускная способность и герметичность, а также простота в обслуживании и ремонте. Сочетание высоких газодинамических характеристик этих клапанов, обеспечиваю-

щих минимальные потери давления и мощности при компримировании газов, с надёжностью и долговечностью делают их наиболее перспективными для применения в углекислотных поршневых компрессорах.

На примере одной из выпускаемых конструкций дисковых клапанов с неметаллическими запорными элементами для второй ступени поршневого компрессора 4ГМ16-100/200М1 покажем как реализуется комплексный подход при проектировании, испытаниях и доводке клапанов на предприятии.

При проектировании клапанов моделируется их работа в цилиндрах конкретно рассматриваемого компрессора. Математическая модель строится с привлечением уравнения состояния газа, термодинамического аппарата, мгновенных расходов газа, газодинамики и динамики запорных элементов (пластин клапана) [4,5]. Модель позволяет рассчитывать оптимальные газодинамические характеристики в зависимости от формы проточной части и высоты подъёма пластин; описать динамику движения запорных элементов, исходя из реальной жёсткости пружин, массы подвижных элементов и частоты вращения коленчатого вала; определить потери давления и мощности с учётом рода сжимаемого газа, степени повышения давления в цилиндрах и скорости движения поршня.

Результаты расчётов можно представлять в графическом виде для анализа происходящих процессов в клапанах при работе компрессора (см. рисунки 4 и 5).

Таблица 2. Основные технические характеристики клапанов ВДТ, НДТ компрессора 4ГМ16-100/200М1

Ступени компрессора	Обозначение клапана*	Высота подъёма пластины клапана h , мм	Диаметр, мм		Площадь, см ²			Объём вредного пространства, см ³		Глубина посадки		Высота бурта H , мм
			Посадочный d	Нагруженный D	Эквивалентная $F_{эв}$	Прохода в седле F_c	Прохода в щели $F_{щ}$	Всасывающего V_v	Нагнетательного V_n	Всас. клапана H_v , мм	Нагн. клапана H_n , мм	
I-ая ступень	ВДТ-320-2,5-1,0	2,5	320	335	110,0	254,5	227,0	973,5	—	12	—	42
	НДТ-320-2,3-1,0	2,3	320	335	105,0	254,5	209,0	—	952	—	12	42
II-ая ступень	ВДТ-250-2,2-1,6	2,2	250	265	66,5	163,5	123,0	580,0	—	10	—	45
	НДТ-250-1,8-1,6	1,8	250	265	59,0	163,5	110,0	—	490	—	10	45
III-ья ступень	ВДТ-220-1,8-2,5	1,8	220	235	48,0	124,0	85,0	500,0	—	10	—	45
	НДТ-220-1,4-2,5	1,4	220	235	40,5	124,0	66,0	—	496,0	—	12	45
IV-ая ступень	ВДТ-200-1,4-4,0	1,4	200	215	31,5	94,5	43,0	394,0	—	10	—	47
	НДТ-200-1,4-4,0	1,4	200	215	31,5	94,5	43,0	—	428	—	15	47
V-ая ступень	ВДТ-125-1,4-16	1,4	125	137	12,0	40,0	20,5	112,0	—	12	—	46
	НДТ-125-1,4-16	1,4	125	137	12,0	40,0	20,5	—	168	—	12	46

Примечания: *) Буквы в обозначениях клапанов: В — всасывающий; Н — нагнетательный; Д — дисковый; Т — с точечными пружинами. Цифры (слева направо): посадочный диаметр, мм; максимальная высота подъёма пластины, мм; наибольший перепад давления на клапане, МПа.

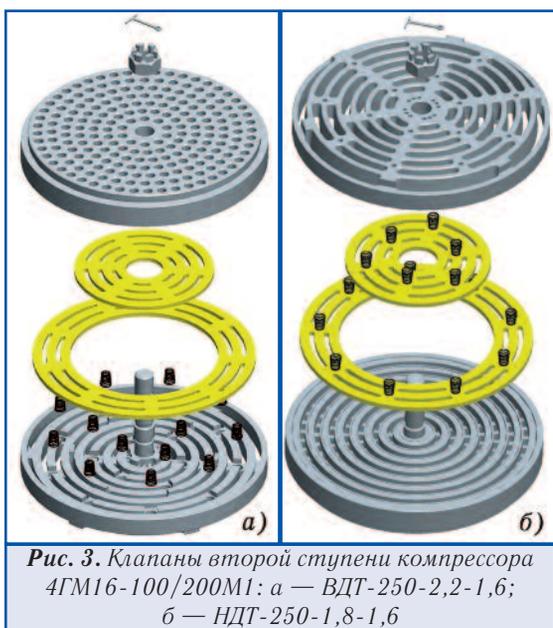


Рис. 3. Клапаны второй ступени компрессора 4GM16-100/200M1: а — ВДТ-250-2,2-1,6; б — НДТ-250-1,8-1,6

Перед установкой на серийно выпускаемый компрессор каждый клапан исследуется на стенде статических продувок с целью определения реальных газодинамических характеристик и сравнения их с расчётными. На рис. 5 приведены результаты продувки дискового нагнетательного клапана ВДТ-220-1,4-2,5.

Последний этап в доводке клапанов — ресурсные испытания на предприятии или непосредственно у заказчика, по результатам которых и принимается окончательное решение о внедрении в производство того или иного клапана.

Данный подход использовался для создания надёжных, высокоэффективных конкурентоспособных клапанов, соответствующих по своему уровню лучшим аналогам ведущих зарубежных фирм.

3.2. Перспективные конструкции уплотнений поршневых компрессоров

Перед производителями поршневых компрессоров

стоят задачи по увеличению выпуска машин, работающих без подачи смазки в цилиндропоршневые группы, или перевода их в режим с ограниченной смазкой.

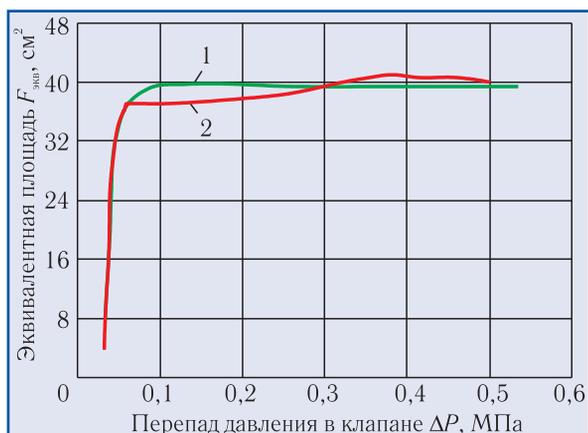


Рис. 5. Результаты продувки дискового нагнетательного клапана НДТ-220-1,4-2,5 при прямом (1) и обратном (2) ходе поршня

Это требование продиктовано рядом причин, в первую очередь, связанных с безопасностью обслуживания поршневых машин, получением компримруемого продукта высокой чистоты и выполнением высоких экологических требований.

На сегодняшний день предприятие обладает опытом применения новых антифрикционных самосмазывающихся материалов. Но это в большей мере относится к ступеням сжатия низкого и среднего давления поршневых компрессоров, а именно — до 100 бар.

При высоких давлениях недостаточно располагать эффективным антифрикционным материалом, а необходимо создание нестандартных конструкций уплотнительных деталей и узлов. Только сочетание новых конструкций с материалами элементов уплотнений может привести к желаемому результату. Именно

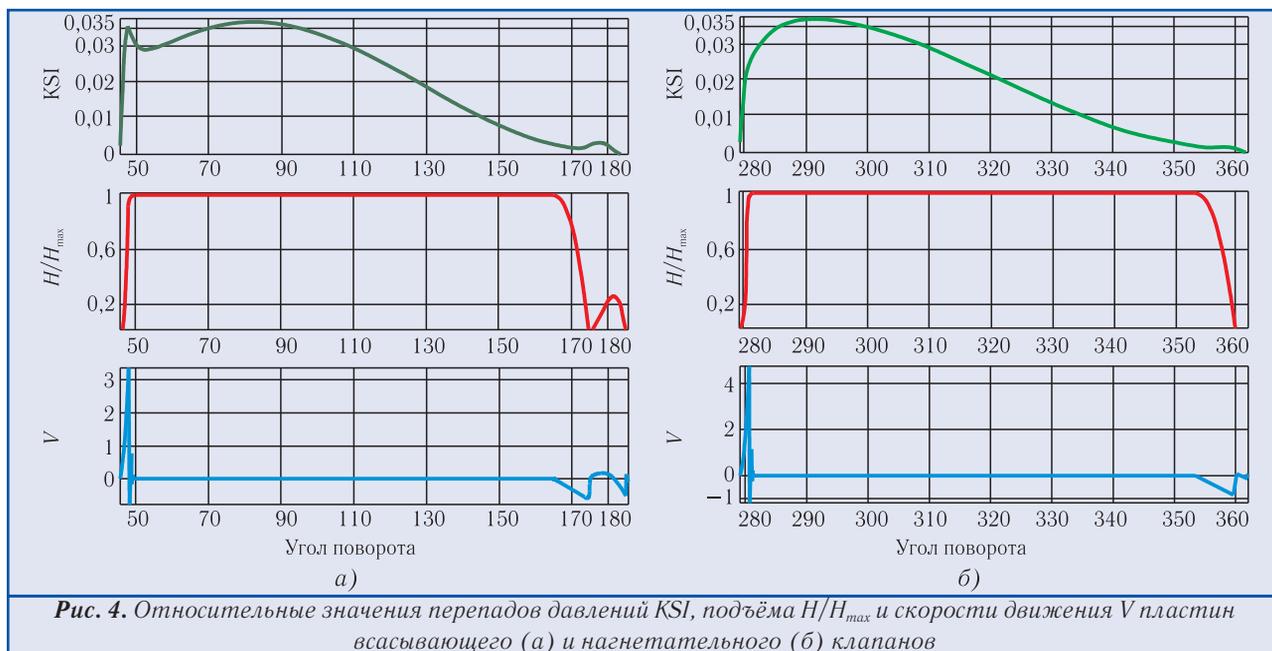


Рис. 4. Относительные значения перепадов давлений KSI, подъёма H/H_{max} и скорости движения V пластин всасывающего (а) и нагнетательного (б) клапанов

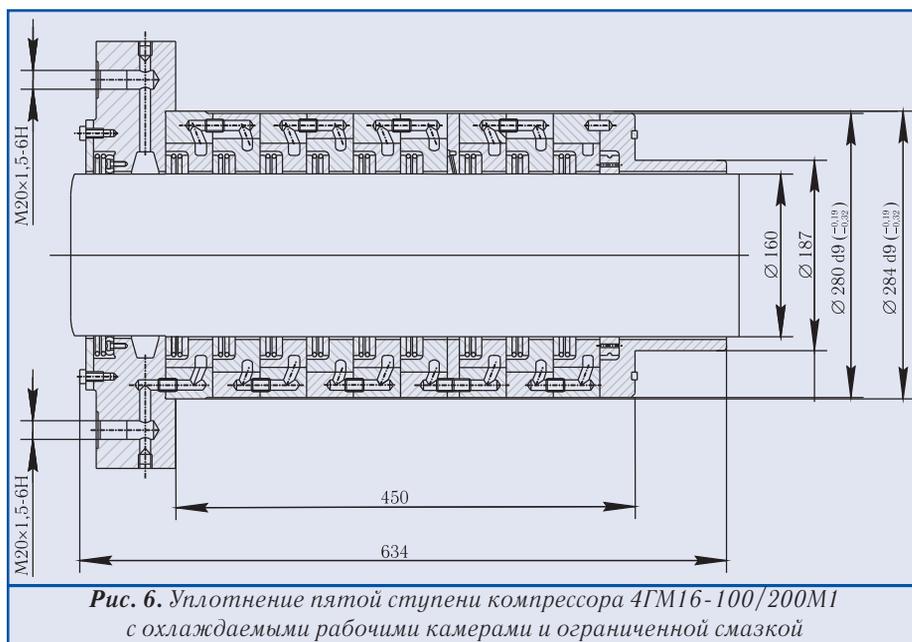


Рис. 6. Уплотнение пятой ступени компрессора 4ГМ16-100/200М1 с охлаждаемыми рабочими камерами и ограниченной смазкой

4ГМ16-100/200М1 диаметр уплотняемой гильзы штока V-ой ступени равен 160 мм. При этом перепад давления на уплотнении составляет 200 бар, а средняя скорость поршня — 4 м/с. Сложные условия эксплуатации и большая площадь трения уплотнительных элементов приводят к выделению существенного количества тепловой энергии. Своевременный отвод энергии трения и максимально возможное уменьшение её выделения за счёт выравнивания перепадов давления в камерах сальникового уплотнения гарантирует надёжную и высококачественную работу уплотни-

так видят решение данной технической проблемы на предприятии, где ведётся активная работа по переводу на бессмазочный режим работы ряда поршневых компрессоров, в том числе и углекислотных.

тельного узла на протяжении длительного периода времени [6-8].

Учитывая данное условие, специалистами предприятия разработана оригинальная конструкция сальникового уплотнения с охлаждаемыми рабочими камерами (рис. 6). При помощи математической модели было определено оптимальное количество уплотнительных элементов конструкции и рассчитаны перепады давления, нагрузки и температуры по длине всего уплотнения (рис. 7). В результате удалось создать конструкцию уплотнения, соответствующую требованиям API 618.

В уплотнении используются самосмазывающиеся высокотемпературные полимерные материалы, способные выдерживать большие контактные давления и температуры, имеющие высокую износостойкость и низкий коэффициент трения.

Наличие ограниченной смазки в созданном уплотнении позволяет добиться ничтожно малого износа уплотнительных элементов и сопрягаемой с ними поверхности трения штока в течение длительного периода эксплуатации и довести срок службы уплотнительного узла, как минимум, до 8000 ч.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На предприятии с использованием накопленного опыта успешно реализуется программа по оснащению ряда компрессоров современными самодействующими клапанами и уплотнениями, разрабатываемыми с применением самых эффективных конструкционных материалов. Внедрение результатов данной работы позволит увеличить производительность КУ без замены электродвигателя, снизить потребляемую мощность в пределах 5-10 %, повысить надёжность и долговечность наиболее ответственных узлов компрессорных машин. При этом даст возможность улучшить качество получаемого компримированного продукта и достичь большой экономии смазочных материалов.

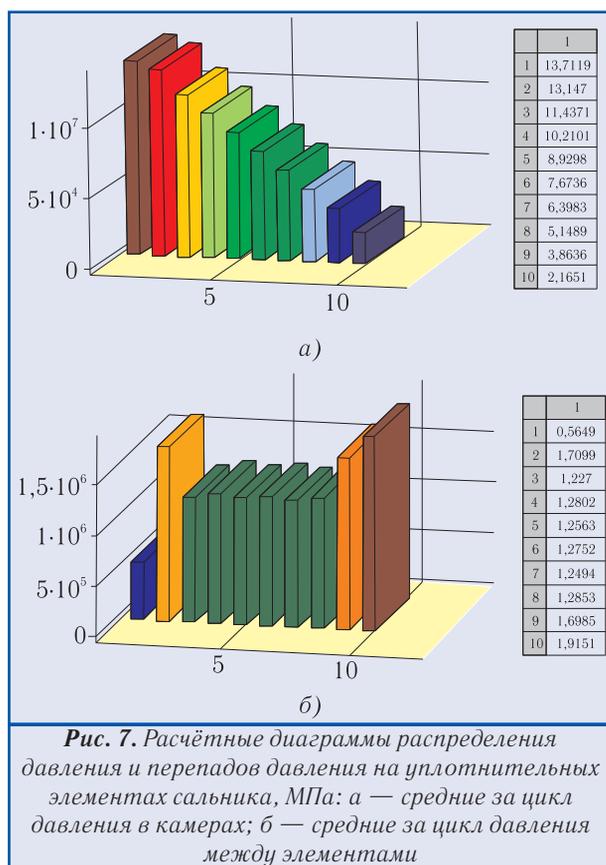


Рис. 7. Расчётные диаграммы распределения давления и перепадов давления на уплотнительных элементах сальника, МПа: а — средние за цикл давления в камерах; б — средние за цикл давления между элементами

Наглядное подтверждение — успешный перевод четырёх ступеней компрессора 4ГМ16-100/200М1 на бессмазочный режим эксплуатации и пятой ступени — на режим с ограниченной смазкой.

В эксплуатируемых компрессорах

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьева Т.Ф., Исаков В.П. Клапаны поршневых компрессоров. — Л.: Машиностроение, 1983. — 158 с.
2. Пластинин П.И. Теория и расчет поршневых компрессоров. — М.: Агропромиздат, 1987. — 271 с.
3. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. — Л.: Машиностроение, 1969. — 744 с.
4. Филиппов В.В. Процессы впуска и выпуска в поршневых компрессорах. — М.: Машгиз, 1960. — 143 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1982. — 591 с.

6. Марченко В.Н. Смирнов А.В. Течение газа в подвижном шероховатом сопряжении бесшмазочного поршневого уплотнения// Вестник НТУ «КПИ». — 1999. — Т. 1. — С. 144-152.

7. Марченко В.Н. Смирнов А.В. О контактных характеристиках в полимерных бесшмазочных уплотнениях. Часть 1: Расчёт контактных параметров на начальном участке сближения// Вестник СумГУ. — 2000. — № 15. — С. 89-94.

8. Марченко В.Н. Смирнов А.В. О контактных характеристиках в полимерных бесшмазочных уплотнениях. Часть 2: Модель металлополимерного шероховатого сопряжения// Вестник СумГУ. — 2001. — № 9-10. — С. 201-207.

 **FRUNZE**
ОСНОВАНО В 1856 ГОДУ

ПАО "Сумское НПО им.М.В.Фрунзе" -
одно из старейших предприятий в мире
по изготовлению поршневых компрессоров

- широкая номенклатура;
- высокая эффективность и надежность;
- большой ресурс работы;
- автоматизированная система контроля, управления и защиты;
- гарантийное обслуживание.

www.frunze.com.ua

ОПЫТ, которому можно доверять!

 Украина, 40004, г.Сумы, ул.Горького, 58
www.frunze.com.ua
управление продаж:
т. +38 0542 78 84 64, ф. +38 0542 22 63 62
отдел маркетинга:
т. +38 0542 78 05 71

 Представительство в России, г.Москва
т. +7 495 745 88 30, ф. +7 495 745 88 31