

**А.Г. Сафиуллин, С.Г. Коханов, Я.З. Гузельбаев, А.В. Зеленов**

ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», ул. Сибирский тракт, 40, г. Казань, РФ, 420029

e-mail: niitk@kazan.ru

## МУЛЬТИПЛИКАТОРНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ ДЛЯ СЖАТИЯ ВОЗДУХА И АЗОТА

*Мультипликаторные центробежные компрессоры для сжатия воздуха, кислорода, азота и хладагентов находят применение в современных производствах продуктов разделения воздуха. Рассматриваются достоинства компрессоров нового поколения «Аэроком», на основе которых созданы три унифицированных ряда. В конструкциях компрессоров применяется консольное расположение рабочих колёс. Такие компрессоры можно создавать на основе минимального числа унифицированных элементов. Приводятся основные характеристики трёх рядов компрессоров «Аэроком». Сообщается о разработке конструкции, которая обеспечивает высокую надёжность соединения рабочего колеса компрессора с валом.*

**Ключевые слова:** Центробежный компрессор. Воздух. Рабочее колесо. Мультипликаторный привод. Эффективность. Надёжность.

**S.G. Kohanov, Ya.Z. Guzelbaev, A.V. Zelenov, A.G. Safiullin**

## MULTIPLICATORY CENTRIFUGAL COMPRESSORS FOR COMPRESSION OF AIR AND NITROGEN

*Multiplicatory centrifugal compressors for compression of air, oxygen, nitrogen and coolants find application in modern manufactures of air separation products. Advantages of compressors of new generation «Aerocom» on the basis of which three unified lines created are considered. In designs of these compressors the console arrangement of driving wheels is applied. Such compressors can be created on the basis of the minimal number of the unified elements. The basic characteristics of three lines of compressors «Aerocom» are resulted. It is informed on development of design which provides high reliability of connection of the driving wheel of the compressor with shaft.*

**Keywords:** Centrifugal compressor. Air. Driving wheel. Multiplicatory drive. Efficiency. Re-liability.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При создании новых воздушных центробежных компрессоров, в том числе для работы в составе производств продуктов разделения воздуха, большое внимание уделяется разработке конструкций с высокими эффективностью и надёжностью, а также с возможно малыми габаритами.

Один из методов, при котором обеспечиваются оптимальные условия работы ступеней сжатия у многоступенчатых быстроходных компрессоров, — применение разных чисел оборотов для различных групп ступеней. Этот подход удаётся конструктивно реализовать при использовании схем мультипликаторных компрессоров.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИПЛИКАТОРНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Наибольшим спросом среди турбомашин, выпускаемых ОАО «Казанькомпрессормаш», пользуются

мультипликаторные центробежные компрессоры (МЦК), разработанные ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». В Российской Федерации и СНГ компрессоры такого типа производительностью до 1000 м<sup>3</sup>/мин и давлением нагнетания до 5 МПа разрабатываются и выпускаются только у нас. ОАО «Казанькомпрессормаш» более 25 лет производит эти компрессоры.

Мультипликаторные центробежные компрессоры предназначены для сжатия воздуха и азота, а также могут применяться для сжатия других газов (фреоны, кислород, пропилен, хлор и т.д.). В сжимаемом и подаваемом потребителю газе отсутствуют продукты смазки и износа.

В сравнении с одновальными центробежными компрессорами МЦК имеют более высокий уровень эффективности и более широкую зону рабочей характеристики за счёт выгодной с термодинамической точки зрения схемы сжатия.

Высокая эффективность достигается следующим:

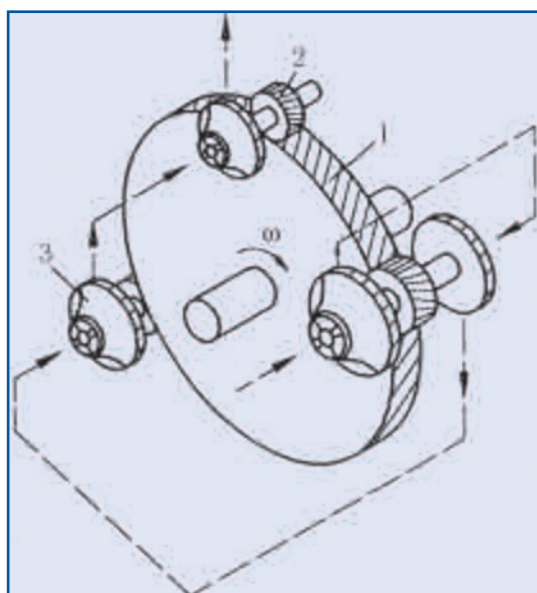
- свободой выбора количества изготавливаемых

ступеней с использованием рабочих колёс оптимальной аэродинамической формы;

- обеспечением оптимальных скоростей для каждого рабочего колеса или группы колёс;
- однородностью осевого входа на всех рабочих колесах;
- охлаждением газа после каждой ступени, т.е. приближением к идеальному изотермическому процессу сжатия с минимумом энергозатрат;
- широким диапазоном регулирования без сброса газа (50-100 % производительности).

Другими преимуществами МЦК являются компактность и малогабаритность; одноэтажность исполнения; моноблочность; максимальная заводская готовность; короткий срок монтажа; минимальные капитальные и эксплуатационные затраты.

Мультипликаторный центробежный компрессор представляет собой конструктивно объединённые в одно целое повышающую зубчатую передачу (мультипликатор) и рабочие ступени компрессора (см. рис. 1). Валы роторов компрессора при этом одновременно выполняют функции шестерён зубчатой передачи [1].



**Рис. 1.** Схема работы привода МЦК:  
1 — ведущее зубчатое колесо;  
2 — валы-шестерни; 3 — рабочие колёса

В течение последних 20 лет выпускаются серийно МЦК общего назначения 32ВЦ-100/9 и 43ВЦ-160/9 (давление нагнетания 0,9 МПа, производительность, соответственно, 100 и 160 м<sup>3</sup>/мин). За этот период их изготовлено и поставлено заказчикам более 250 шт. Для воздухоразделительной установки выпущен МЦК для сжатия воздуха ВЦ-75/10 (производительность — 75 м<sup>3</sup>/мин, давление нагнетания — 1 МПа) на передвижной платформе с приводом от дизельного двигателя.

### 3. МУЛЬТИПЛИКАТОРНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ «АЭРОКОМ»

Накопленный опыт производства и проектирова-

ния МЦК позволил, начиная с 1993 г., приступить к разработке и внедрению в производство второго поколения этого типа компрессоров под условным названием «Аэроком». Основной целью при этом ставилось расширение области применения и создание более гибкой конструкции, легко адаптируемой к различным параметрическим вариациям.

В конструкциях компрессоров этого ряда применяется консольное расположение рабочих колёс. Это позволяет создавать компрессоры на основе минимального числа унифицированных элементов, обеспечивающих при этом всю область параметров.

Разработаны и внедрены в последние годы три унифицированных ряда МЦК [2], охватывающих принятое поле параметров, имеющих единую систему унифицированных базовых ступеней сжатия, мультипликаторов, охладителей газа и систем автоматизации:

- ряд нагнетателей «Аэроком Н» — одноступенчатых центробежных компрессоров производительностью от 30 до 1000 м<sup>3</sup>/мин и степенью сжатия до 2,5;
- ряд компактных компрессоров «Аэроком КА» со встроенными охладителями газа на производительность от 30 до 200 м<sup>3</sup>/мин и давления нагнетания до 1,6 МПа;

– ряд компрессоров «Аэроком АА» и «Аэроком АС» с выносными охладителями газа производительностью от 75 до 1000 м<sup>3</sup>/мин и давлением до 5 МПа.

Расширение области применения компрессоров рядов «Аэроком» по сравнению с компрессорами первого поколения достигнуто за счёт:

- применения проточной части с полуоткрытыми рабочими колёсами, допускающими увеличение периферийных скоростей;
- увеличения на 25 % максимального значения коэффициента расхода ступеней;
- увеличения поверхностей охлаждения газоохладителей;
- использования регулирующих устройств на входе в ступени или установки механизмов поворота лопаток диффузоров.

В настоящее время МЦК второго поколения по-прежнему в металлургическую, нефтехимическую, нефтеперерабатывающую, оборонную отрасли, а также в технологии, связанные с выполнением космических программ.

Компрессоры «Аэроком» используются в системах термостатирования стартовых комплексов космодромов как морского, так и наземного базирования. Компрессор «Аэроком 43-120/9 ОМ5» нашёл своё применение в международном проекте «Морской старт» для запуска ракет с морской платформы в районе экватора в Тихом океане (см. фото 2).

Можно также отметить как достижение создание первого российского МЦК «Аэроком АА-100/35А» на давление нагнетания 35 атм. (фото 3) для нефтехимической промышленности. Два таких компрессора для сжатия азота эксплуатируются в ОАО «Нижнекамскнефтехим».

Сейчас нами предлагается для работы в составе воздухоразделительных установок широкая гамма МЦК

для сжатия воздуха и азота во всём интервале указанных выше производительностей и давлений нагнетания.



**Фото 2.** Компрессорная установка «Аэроком 43-120/9 OM5»



**Фото 3.** Внешний вид установки «Аэроком AA-100/35A»

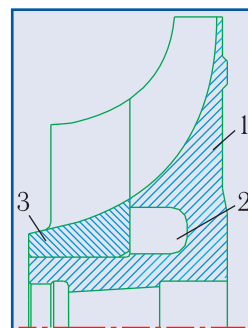
В конструктивном плане МЦК, в зависимости от характеристик компрессора, могут иметь от одной до шести ступеней сжатия, расположенных в своих корпусах, которые крепятся на корпусе мультипликатора. После каждой ступени установлены водяные газоохладители, которые встроены в корпус мультипликатора или сделаны выносными, располагающимися по его наружному периметру. В качестве промежуточных и концевых газоохладителей могут применяться аппараты воздушного охлаждения, которые обычно располагаются вне помещения.

Мультипликатор с закреплёнными на нём ступенями сжатия, с водяными газоохладителями по периметру, а также система смазки МЦК располагаются на одной стальной раме, являющейся одновременно и маслобаком. Всё это формирует так называемый блок компрессорного агрегата. В МЦК малых производительностей приводной электродвигатель устанавливается на единой раме. В случае создания МЦК больших производительностей и высоких давлений элект-

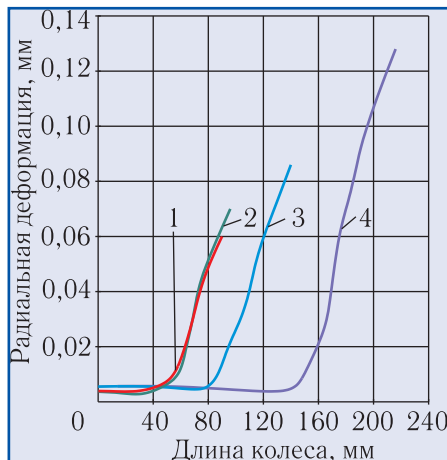
ропривод поставляется отдельным блоком.

В МЦК для сжатия азота и воздуха применяются сухие щелевые уплотнения с радиально-подвижными графитовыми кольцами, в промежуточную камеру которых подаётся уплотняющий газ (азот или воздух). С целью уменьшения утечек и обеспечения возможности радиальных перемещений уплотнительных колец, уплотнения ступеней высокого давления (от 2 МПа) выполняются двухкамерными. Уплотняющий газ подаётся из отдельного источника только перед пуском, а в процессе работы он поступает в уплотнения за счёт утечек из ступеней.

В МЦК применяются рабочие колеса закрытого и полуоткрытого типов. Окружные скорости полуоткрытых рабочих колёс достигают 380-400 м/сек, а частоты вращения валов — 36000-38000 мин<sup>-1</sup>.



**Рис. 4.** Рабочее колесо с кольцевой полостью: 1 — основной диск; 2 — кольцевая полость; 3 — вращающийся направляющий аппарат



**Рис. 5.** Изменение радиальной деформации внутренних поверхностей ступицы по длине для колёс разных диаметров: 1 — 255; 2 — 315; 3 — 400; 4 — 638 мм

При проектировании рабочих колёс (РК), работающих при высоких окружных скоростях, серьёзное внимание уделяется обеспечению надёжности их соединения с валом. Для РК, устанавливаемых на вал с натягом, необходимо добиваться уменьшения дефор-



мации посадочной поверхности ступицы РК в радиальном направлении при действии центробежных сил. С целью уменьшения деформаций рабочие колеса изготавливаются из двух частей — основного диска с цилиндрическими или радиальными лопатками и вращающегося направляющего аппарата с трёхмерными загнутыми вперед лопатками, установленного на ступице основного диска (см. рис. 4). В ступице выполнена кольцевая полость, разделяющая ступицу на внутреннее и наружное кольца.

Наличие кольцевой полости в ступице обуславливает особенность радиальной деформации внутреннего кольца. Участок внутреннего кольца, удаленный в осевом направлении от перегородки, соединяющей внутреннее и наружное кольца, на расстояние больше 15 % диаметра рабочего колеса, характеризуется минимумом радиальных перемещений (см. рис. 5). Малые перемещения этого участка обусловлены действием на него центробежных сил лишь от вращения массы собственно внутреннего кольца, которая во много раз меньше массы периферийной части колеса. Радиальное перемещение размещенной на этом участке посадочной поверхности не превышает 5-10 % от предварительно создаваемого натяга.

Расчёты РК различных диаметров подтверждают минимальную деформацию внутреннего кольца ступицы на расстоянии от внешней поверхности перегородки более 0,10-0,15 наружного диаметра РК. Из графиков радиальных перемещений внутренних поверхностей ступицы (в том числе посадочной поверхности) видно, что кривые перемещений для РК с диаметрами 255, 315, 400 и 638 мм подобны. Расчёты проводились для окружной скорости 395 м/с. Материал РК

— сталь 07X16H6.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МЦК второго поколения по желанию заказчиков могут быть оборудованы эффективными регулирующими устройствами, позволяющими изменять их производительность в диапазоне 50-110 % от номинального значения. В качестве таких устройств используются входные регулируемые аппараты или поворотные лопаточные диффузоры.

Все компрессоры оснащены системами автоматизации с применением программируемых микропроцессорных контроллеров, обеспечивающих передачу и обработку информации по каналам цифровой связи. Системы автоматизации оснащены современным вибромониторингом, обеспечивают эффективный контроль за работой МЦК, защиту от аварийных режимов работы и позволяют осуществить сложные алгоритмы регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шнепп В.Б. Конструкция и расчёт центробежных компрессорных машин. — М.: Машиностроение, 1995. — 240 с.
2. Петросян Г.Г., Коханов С.Г., Муртазин Р.Ф. Разработка и производство центробежных мультипликаторных компрессоров/ Труды II-го симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования-1996». — С.-Петербург: СПбГТУ, 1996. — С. 150-154.



**“ХИМИЧЕСКОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ”**  
Научно-технический и производственный журнал  
Журнал издаётся с 1932 г.  
Переиздается в США под названием «CHEMICAL AND PETROLEUM ENGINEERING»



Распространяется по подписке в России, странах СНГ, Европы, Азии и Америки  
Индекс по каталогу Роспечати – 71042  
Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» – 38589  
Подписку на журнал можно оформить также непосредственно в редакции

Среди наших подписчиков — предприятия, научно-исследовательские, конструкторские и проектные организации машиностроения, химической, нефтегазовой и нефтеперерабатывающей промышленности, многие высшие учебные заведения, отраслевые и территориальные библиотеки.

**ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА:**  
- исследования, расчеты, технология изготовления и опыт эксплуатации всех видов химического и нефтегазового оборудования, криогенной и холодильной техники, компрессоров, насосов и промышленной трубопроводной арматуры;  
- инженерная экология; материаловедение и защита оборудования от коррозии;  
- безопасность, диагностика, ремонт;  
- сертификация и стандартизация.

ISSN 0023-1126



**Тел./факс: +7 (499) 267-07-64; 267-19-85**  
**E-mail: himnef@msuie.ru**  
**Адрес редакции: МГУИЭ,**  
**ул. Старая Басманная, 21/4,**  
**Москва, РФ, 105066**

*Публикация статей и рекламы в нашем журнале будет содействовать успеху Вашего предприятия!*