МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра стационарных и транспортных машин

А. П. Абрамов

ТУРБОКОМПРЕССОРЫ

инструкция по изучению по изучению устройства, принципа действия и приемов эксплуатации для студентов специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика» всех форм обучения

Рекомендована в качестве методических указаний учебно-методической комиссией специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика»

Кемерово 2011

Рецензенты:

Ю. С. Щербаков, доцент кафедры стационарных и транспортных машин.

И. В. Бреусова, секретарь УМК специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика»

Абрамов Александр Прохорович. ТУРБОКОМПРЕССОРЫ: инструкция по изучению устройства, принципа действия и приемов эксплуатации [Электронный ресурс]: для студентов специальностей 140104 «Промышленная теплоэнергетика», 150402 «Горные машины и оборудование» всех форм обучения / А. П. Абрамов. – Электрон. дан. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); зв. ; цв. ; 12 см. – Систем. требования : Pentium IV; ОЗУ 512 Мб ; Windows 2003 ; (CD-ROM-дисковод) ; мышь. – Загл. с экрана.

В инструкции приведена таблица с характеристиками центробежных компрессоров, устройство промышленной компрессорной установки, конструкции и описание центробежного, винтового, ротационно-пластинчатого и жидкостно-кольцевого (водокольцевого) компрессоров, которые предназначены для сжатия воздуха и технологических газов и могут быть использованы как вакуумные насосы.

© ГУ КузГТУ
© Абрамов А. П.

1. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Центробежные компрессоры в сравнении с поршневыми имеют меньшие габариты и массу приходящуюся на единицу производительности. Они обеспечивают подачу сжатого газа (воздуха) без пульсаций. В них отсутствуют поступательно движущиеся части и, следовательно, отсутствуют инерционные силы, передаваемые на фундамент. Этим компрессорам не требуются всасывающие и нагнетательные клапаны – имеется только обратный клапан. Сжатие газа происходит без загрязнения его маслом, так как в рабочей зоне нет трущихся пар, к которым необходимо было бы подводить смазку, поэтому и расход её незначительный. Возможность соединения с быстроходной турбиной или электродвигателем через мультипликатор позволяет иметь производительность до 7000 $м^3$/мин и меньшие затраты труда при обслуживании в сравнении с поршневыми компрессорами той же производительности.

Недостатки центробежных компрессоров: меньший чем у поршневых компрессоров КПД, большая ограниченность степени сжатия газа одной ступенью и как следствие – многоступенчатость, возможность устойчивой работы только в определенных границах производительности, зависимость конечного давления от производительности, невозможность частых включений и остановок, сравнительно большая минимальная производительность 40 $м^3$/мин.

В промышленности России для сжатия воздуха и газов широко применяются центробежные турбокомпрессорные установки производства Невского завода имени Ленина (НЗЛ), Хабаровского завода “Энергомаш” и Казанского компрессорного завода.

Технические характеристики центробежных компрессоров

модель	Q, $м^3$/мин	P, ата	$Z_С$, ед	$Z_Ц$, ед	$n_К$, об/мин	$m_К$, т	двигатель	$N_{ДВ}$, кВт	$n_{ДВ}$, об/мин	$m_{ДВ}$, т
К-7000-41-1	6700	5,3	4	1	3450	-	турбина	28500	3450	-
К-5500-42-1	4350	5,2	4	1	3440	-	турбина	17200	3440	-
К-3250-41-2	3250	4,5	4	1	3320	-	турбина	11200	3320	-
К-3250-42-1	2450	4,5	4	1	3290	-	турбина	8500	3290	-
К-3000-61-6	3200	6,8	6	1	3260	-	турбина	14250	3260	-
К-1500-62-2	1590	7,7	6	1	4470	-	СТМ-8000	8000	3000	-
К-905-61-1	915	7,7	6	1	5690	-	СТМ-5000	5000	3000	-
К-605-181-1	610	29,2	18	ЦВД ЦНД	14130 7240		2 двигателя для пиролиза этана	7000	3000	-
К-500-61-1	525	9	6	1	7636	14,1	СТМ- 3500-2	3500	3000	19,3
К-500-61-2	510	7,5	6	1	7455	14		3500	3000	19,3
К-400-51-2	400	4,9	4 + 1д	1	5585	12	СТМ-1500	1750	3000	7,2
К-380-103-1	345	20,5	10	ЦВД ЦНД	17427 8100		2 двигателя попутный газ	5300	8100	-
К-350-61-2	370	7,35	6	1	8615	10	СТМ-2500-2	2500	3000	14
К-345-92-1	370	14,0	9	1	8600	-	СТМ-2500-2	2500	3000	14
К-250-61-1	250	9	6	1	11230	7	СТМ-1500-2	1750	3000	10,5
К-250-61-2	250	9	6	1	10923	6,7	СТМ-1500-2	1750	3000	10,5
К-210-62-1	345	2,2	6	1	6970	-	для пропилена			
К-100-63-1	100	9	6	1	17483	этилен	СТД 1000/600	1000	2980	7,2
К-60-82-1	44	1,7	8	1	12570	-	СТМ-2000	2000	3000	12
ЦК-115/9	115	9	2 + 4	2	13800	4	АЗМ 1000/6000	1000	2980	7,2
ЦК-135/8	135	7,8	2 + 4	2	13645	4	СТД 1000/600	1000	2980	7,2
ЦК-160/9	160	9	4	1	-	-	2АРМ 1000/6000	1000	2980	7,2

Q и P – производительность компрессора и избыточное давление газа на выходе; $Z_С$ и $Z_Ц$ – число ступеней и цилиндров компрессора; $n_К$ и $m_К$ – частота вращения ротора и масса компрессора; $N_{ДВ}$, $n_{ДВ}$ и $m_{ДВ}$ – мощность, частота вращения и масса двигателя.

Компрессорная установка является сложным электромеханическим комплексом. Его основное и вспомогательное оборудование устанавливается, как правило, на двух или трех уровнях рис. 1 в капитальном здании, построенном из негорючих материалов. В разных регионах России здания компрессорных станций строятся, например, полностью из сборного железобетона; из литого железобетонного каркаса с перекрытиями и наружных стен из пенобетона; из сборного железобетонного каркаса, литого перекрытия и наружных стен из кирпича или шлакоблоков. В северных районах на вечной мерзлоте компрессорные станции строят одноэтажными и бес подвалов.

Все оборудование компрессорной установки на каждом уровне (этаже) монтируется на прочные железобетонные фундаменты. Прочность межэтажных перекрытий рассчитывается с учетом не только массы устанавливаемого на них оборудования, но и дополнительной динамической нагрузки, которая может возникнуть при взрыве компрессора и пожаре. Для снижения разрушительного воздействия ударной волны на несущие элементы и конструкции здания компрессорной станции в наружных стенах на каждом уровне (этаже) предусмотрены предохранительные клапаны. Они выполняются в машинном зале в виде остекленных оконных проемов большой площади, а на нижних отметках в виде встроенных диафрагм из листовой стали толщиной 0,5-1,0 мм.

Для активного подавления возгораний и тушения пожаров современные компрессорные станции должны обязательно комплектоваться автоматической пенно-генерирующей установкой с подачей пены на любую отметку (этаж).

Воздух из атмосферы за счет избыточного давления поступает в воздухозаборную «шахту» установки. «Шахты» могут быть индивидуальными – для каждого компрессора или групповыми – для нескольких компрессоров. Групповых воздухозаборных «шахт» на станции должно быть не менее двух.

Из «шахты» через фильтры воздух подается по всасывающему трубопроводу к диффузору, на входе которого установлена управляемая дроссельная задвижка. Оборудование подводящего трубопровода устанавливается на нижнем этаже компрессорной станции, что способствует некоторому снижению температуры воздуха на входе в компрессор и повышению безопасности его работы. Кроме этих элементов установки на нижнем этаже здания компрессорной станции размещены промежуточные холодильники, нагнетательный патрубок, маслостанция систем смазки, охлаждения и управления компрессором.

Маслостанция имеет два автономных блока. Каждый из них рассчитан на обеспечение нормальной работы компрессора во всем диапазоне регулирования его производительности. Второй блок является «горячим» резервом. Охлаждение масла, как правило, водяное. Температура «холодного» масла подаваемого для смазки компрессора, редуктора и двигателя не должна превышать 25^{o}C, а «горячего» в дренажном трубопроводе – не более 65^{o}C.

Основное оборудование компрессорной установки сам компрессор, редуктор (мультипликатор, приводной двигатель и возбудитель устанавливаются на верхнем этаже. Между собой компрессор К-500-61-1, редуктор и двигатель соединяются зубчатыми муфтами, а возбудитель соединен с двигателем цепной муфтой.

Центробежные компрессоры выполняют многоступенчатыми, так как степень повышения давления одним колесом (ступенью) как правило не превышает 1,3-1,4. Их проточная часть и корпус разделен на секции, в каждой из которых по 2-3 ступени (рабочих колеса). Причем, колеса одной секции имеют один диаметр, но разную ширину лопаток. В каждой последующей ступени компрессора ширина лопаток меньше, чем в предыдущей. Колеса последующих секций имеют меньший диаметр, чем предыдущих. После последовательного прохождения газом рабочих колес первой секции он отводится через нагнетательный патрубок в промежуточный холодильник, где температура сжатого газа (воздуха) должна опуститься до 40^{o}C (не более). Из первого промежуточного холодильника охлажденный газ подается через всасывающий патрубок во вторую секцию компрессора для дальнейшего сжатия. Сжатый газ из второй секции поступает на охлаждение во второй промежуточный холодильник, где снова охлаждается до 40^{o}C и возвращается от туда в третью секцию компрессора К-500-61-1 рис. 2. Из последней секции

компрессора сжатый газ через обратный клапан подается в магистральный трубопровод, по которому он транспортируется потребителю. При необходимости питания потребителя «холодным» сжатым газом перед подачей его в магистральный трубопровод он дополнительно охлаждается до требуемой температуры в концевом холодильнике.

Центробежные компрессоры с избыточным давление газа более 1,5-2 МПа (15-20 атм) на выходе из последнего напорного патрубка выполняются двухцилиндровыми с общим двигателем или с отдельным двигателем на каждый цилиндр.

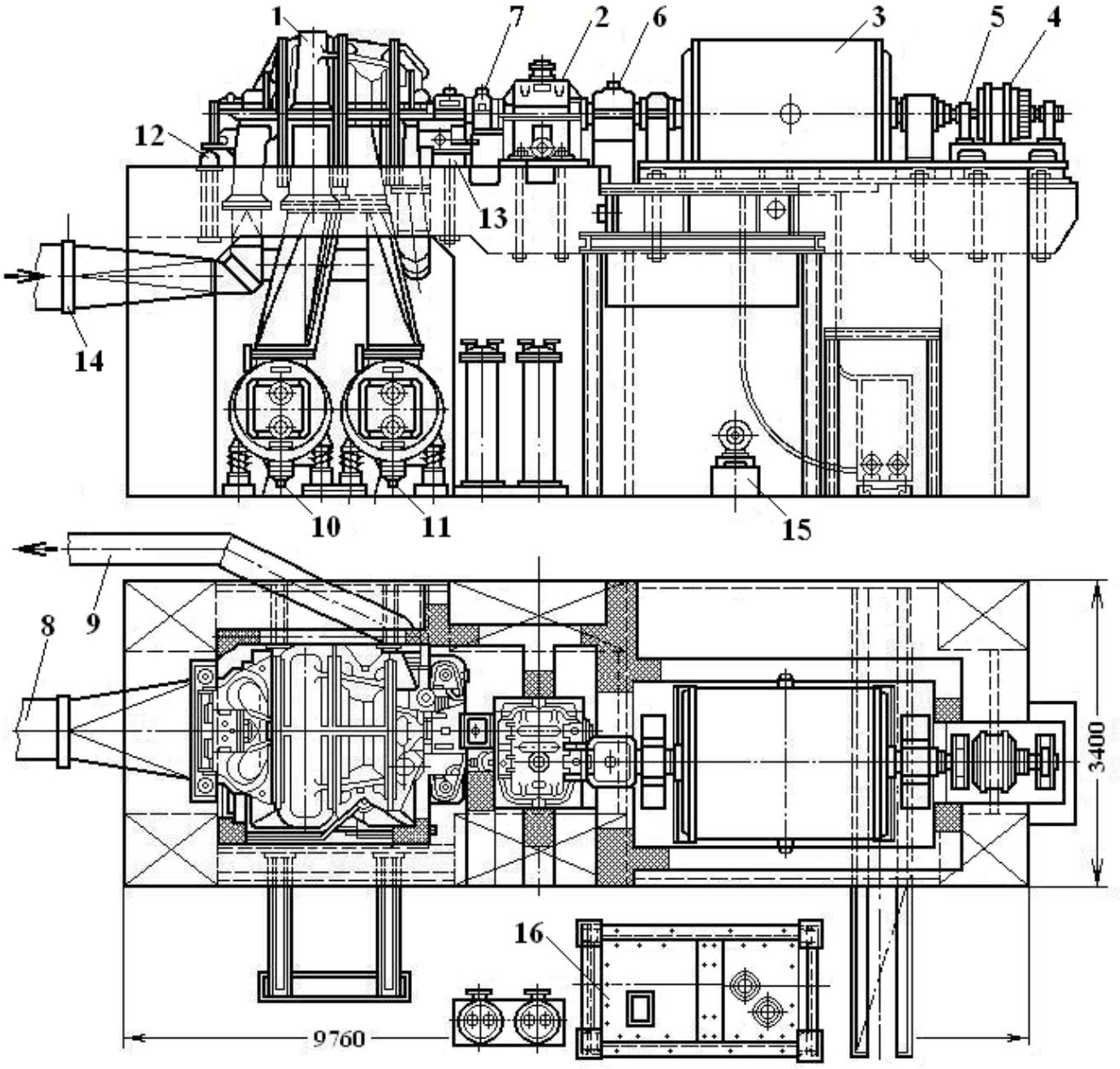


Рис.1. Компрессорная установка К-500-61-1:
1 – компрессор К-500-61-1; 2 – редуктор (мультипликатор); 3 – электродвигатель, 4 – возбудитель; 5 – цепная муфта; 6 и 7 – зубчатые соединительные муфты; 8 и 9 – всасывающий и нагнетательный трубопровод; 10 и 11 – внешний промежуточные охладитель низкого и высокого давления; 12 и 13 – фундаментальная рама передняя и задняя (фикс-пункт); 14 – дроссельная задвижка с приводом; 15 – маслонасосы; 16 – маслобак.

Рабочие колеса современных отечественных центробежных компрессоров – закрытого типа изготавливаются из углеродистых сталей. Основные элементы рабочего колеса: лопатки, передний (накрывной) и задние диски, ступица; – штампуются или куются, а соединяются меж-

ду собой сваркой, редко заклепками или пайкой. Лопатки колеса в количестве 14–28 загнуты назад с выходным углом 40-50^{o} и при сравнительно небольших габаритах способны выдерживать большие нагрузки возникающие при окружных скоростях 200–300 м/с и более. Колеса закреплены на валу компрессора шпонками, дистанционными втулками и стопорной гайкой.

Вал компрессора, имея собственную массу в несколько тонн, воспринимает от рабочих колес в номинальном режиме нагрузку до 1–28,5 МВт, поэтому опирается на 2, 3 или 4 подшипника скольжения. В компрессоре К-500-61-1 две подшипниковые опоры, расположены периферийно. Стальные вкладыши подшипников имеют на рабочей поверхности баббитовое покрытие, которое позволяет в два раза уменьшить силу трения при запуске компрессора. Число подшипников увеличивается с ростом мощности центробежного компрессора.

Для устранения перетечек воздуха с выхода рабочего колеса на его вход, каждое колесо на входе имеет однощелевое уплотнительное разрезное кольцо из чугуна, которое устанавливается перед ним в расточку корпуса.

Для устранения перетечек сжатого воздуха между ступенями диафрагмы, разделяющие камеры рабочих колес, имеют в «контакте» с дистанционными втулками развитые уплотнения гребенчатого типа. Уплотнительные гребни из полосовой меди толщиной 1,0-1,5 мм накатаны на наружные цилиндрические поверхности дистанционных втулок с шагом 4-5 мм.

Внешние уплотнения компрессора от подсоса воздуха из атмосферы и утечек сжатого газа из камеры думмиса гребенчатые с меньшим числом гребней чем на диафрагмах в 1,5 раза.

В горной и химической промышленности распространение получили центробежные компрессоры К-500-61-1 и К-250-61-2 (рис. 2) однотипной конструкции. Эти компрессоры имеют по 6 рабочих колес – 6 ступеней сжатия, которые по парно объединены в три секции. Все 6 колес установлены на валу с расположением всасывающих отверстий в противоположную сторону от привода. В пределах одной секции рабочие камеры колес разделены диафрагмой, которая снабжена канальным диффузором и обратным направляющим аппаратом.

Осевые усилия всех рабочих колес направлены в сторону переднего подшипника и от них передается через ступицы и дистанционные втулки на вал (на буртик перед первым колесом). В результате на вал компрессора действует суммарное осевое усилие более 10 кН. Это усилие уравновешивается действием сжатого воздуха на разгрузочный поршень (думмис). Осевая нагрузка на думмис направлена в сторону привода. Полностью разгрузить вал от осевого усилия думмис не может, поэтому оставшуюся ее часть воспринимает упорный подшипник расположенный в заднем фонаре. Отвод воздуха от думмиса производится через байпас во всасывающий патрубок первой секции компрессора.

Корпус компрессора литой, чугунный, с горизонтальной плоскостью разъема. Эта особенность конструкции упрощает вопросы транспортирования, монтажа и ремонта компрессора в целом и его отдельных элементов. Все всасывающие и нагнетательные патрубки расположены в нижней половине корпуса компрессора и ниже железобетонного перекрытия между верхним и нижним этажами компрессорной станции (цеха). В нижнюю часть корпуса укладывается полностью собранный ротор, поэтому ее механики часто называют постелью. Для ремонта ротора не необходимости отсоединять патрубки компрессора от всасывающего и напорного трубопровода и холодильников.

Эти компрессоры снабжены автоматической принудительной системой смазки и регулирующим устройством – дроссельной заслонкой во всасывающем трубопроводе, посредством которой поддерживается постоянное давление нагнетания. Система защиты имеет регулятор противопомпажной защиты, обеспечивающей автоматический перепуск сжатого воздуха на вход первой ступени, реже в атмосферу, избыточного количества воздуха при достижении компрессором критической производительности.

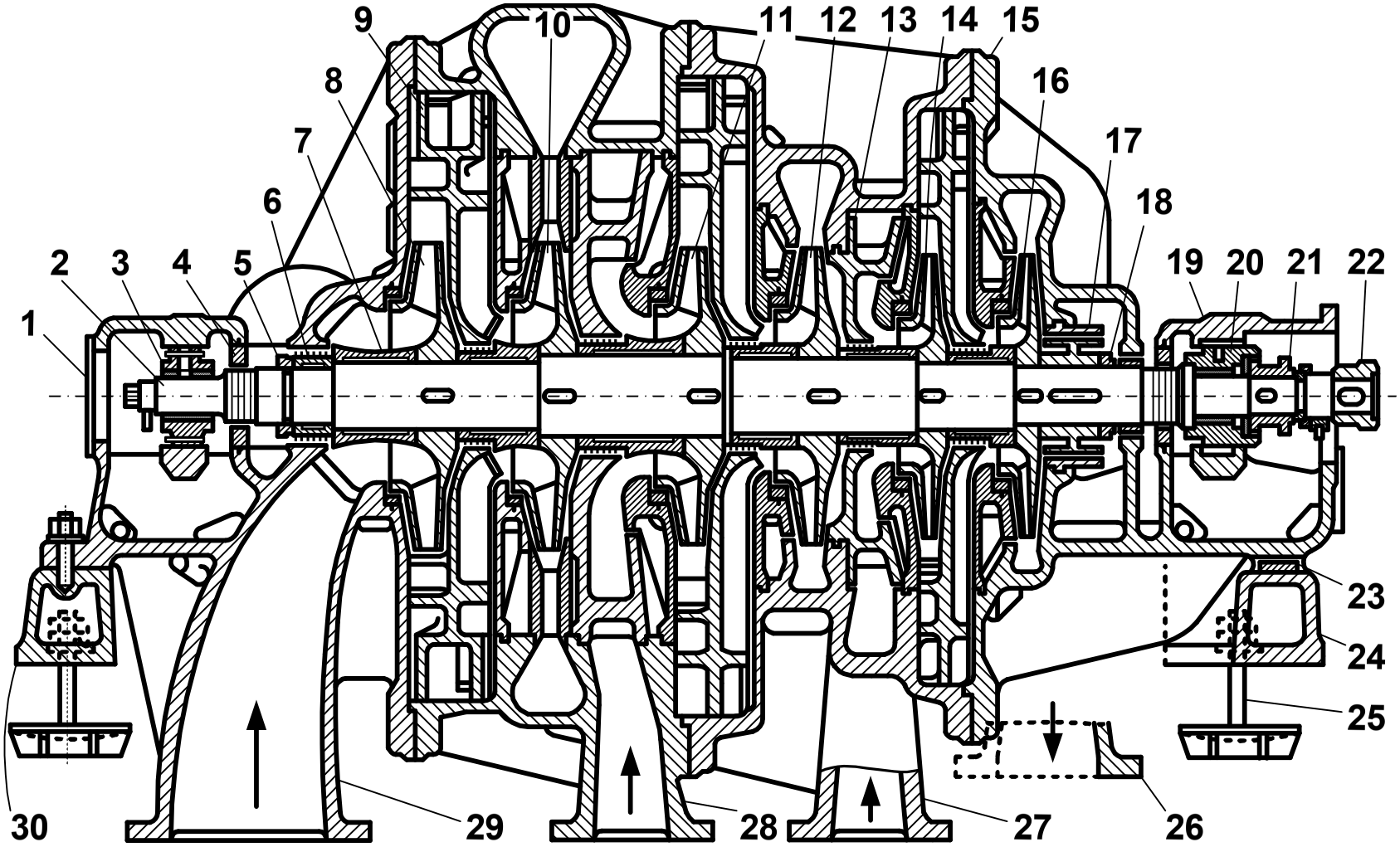


Рис. 2. Продольный разрез компрессора К-500- 61-1:

1 – глухая крышка; 2 – коренной вал; 3 – передний радиальный подшипник; 4 – уплотнение подшипниковой опоры; 5 и 18 – стопорные гайки; 6 – переднее концевое уплотнение; 7 – дистанционная втулка; 8, 10-12, 14 и 16 – рабочие колеса; 9 – обратный направляющий аппарат; 13 – диафрагма; 17 – думмис; 19 – крышка задней подшипниковой опоры; 20 – задний радиально-упорный подшипник; 21 – гребень; 22 – зубчатая полумуфта; 23 – направляющая шпонка; 24 – задняя фундаментальная рама (подвижная опора); 25 – анкер; 26 – нагнетательный (выхлопной) патрубок; 27-29 – всасывающий патрубок 3-й, 2-й и 1-й секции; 30 – передняя фундаментальная рама (фикс-пункт)

2. ВИНТОВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Винтовые компрессоры относятся к гидравлическим машинам объемного действия. Рабочими органами этих машин являются роторы с нарезанными на них винтовыми зубьями, количество роторов от одного до трех. Наибольшее распространение на промышленных предприятиях разных отраслей, а также при ведении геологоразведочных работ в нашей стране получили двухроторные компрессоры, устройство одного из которых приведено на рис. 3.

Различают два вида винтовых компрессоров: сухого сжатия и маслозаполненные. Одноступенчатые компрессорные установки сухого сжатия имеют более простое устройство и обеспечивают повышение давления сухого чистого воздуха (в общем случае газа) в 3-4 раза.

В маслозаполненных одноступенчатых компрессорах, во всасывающий патрубок впрыскивается масло, по массе превышающее массу сжимаемого воздуха в 6–8 раз. Использование смазки в таких количествах обеспечивает значительное снижение температуры сжимаемого воздуха, увеличение давления газа в 8-9 раз и полностью устраняет перетечки сжимаемого газа в пределах рабочей камеры компрессора.

Корпус компрессора отлит из чугуна и состоит из крышки и основания, которые соединяются между собой через паронитовую прокладку по горизонтальному фланцу. В нижней части основание имеет четыре лапы, которыми корпус опирается на раму (компрессоры малой и средней производительности) или фундамент (компрессоры большой производительности). Со стороны привода в основании имеется всасывающий патрубок, направленный вниз. Крышка корпуса со стороны задней подшипниковой опоры имеет нагнетательный патрубок, направленный вверх. В средней части корпус имеет две параллельные цилиндрические расточки разного диаметра, оси которых лежат в плоскости его разъема. Эти расточки образуют полость с поперечным сечением в форме восьмерки. Со стороны нагнетательного патрубка внутри корпуса в верхней части выполнено нагнетательное окно, а со стороны всасывающего патрубка в нижней части – всасывающее окно. В собранном корпусе со стороны задней подшипниковой опоры выполнены цилиндрические расточки для установки внешних уплотнений и подшипников для каждого ротора.

Со стороны двигателя к собранному корпусу прифланцован передний фонарь, который имеет проточки под внешние уплотнения и подшипники для каждого ротора и камеру, где размещаются синхронизирующие шестерни. Со стороны компрессора фонарь имеет кольцевую камеру всасывания для равномерного подвода газа, сечение которой уменьшается снизу (от патрубка) вверх.

Роторы современных винтовых компрессоров представляют собой косозубые шестерни (винты с большим углом подъема спирали) с малым числом зубьев специального профиля. Ведущий ротор имеет больший диаметр и, как правило, четыре широких выпуклых зуба. Он соединен через мультипликатор с приводным двигателем. Ведомый ротор меньшего диаметра, имеет зубья вогнутые и тонкие, а их число в полтора раза больше чем у ведущего ротора. На торцах винтовой части роторов, а также на наружном диаметре предусмотрены уплотнительные усики, выполненные за одно целое с роторами или зачеканенные в профрезерованные узкие канавки.

Роторы в сборе устанавливают в расточки основания корпуса и они опираются на подшипники. В компрессорах малой и средней производительности устанавливаются роликовые подшипники качения. На компрессорах большой производительности применяются подшипники скольжения.

Частота вращения ведомого ротора меньше чем у ведущего в 1,5раза. Крутящий момент от ведущего ротора передается на ведомый ротор через пару синхронизирующих шестерен, которые установлены неподвижно на шейки роторов со стороны двигателя.

Газ поступает на компрессор снизу, например, из подвального помещения, где установлено вспомогательное оборудование установки и проложен всасывающий трубопровод или короб. Повышение давления газа достигается в этих компрессорах за счет уменьшения его объема в рабочей полости, образованной зубьями и впадинами двух параллельно расположенных вин-

тов-роторов. Следует заметить, что при вращении роторы не соприкасаются между собой и с корпусом компрессора ни в одной точке.

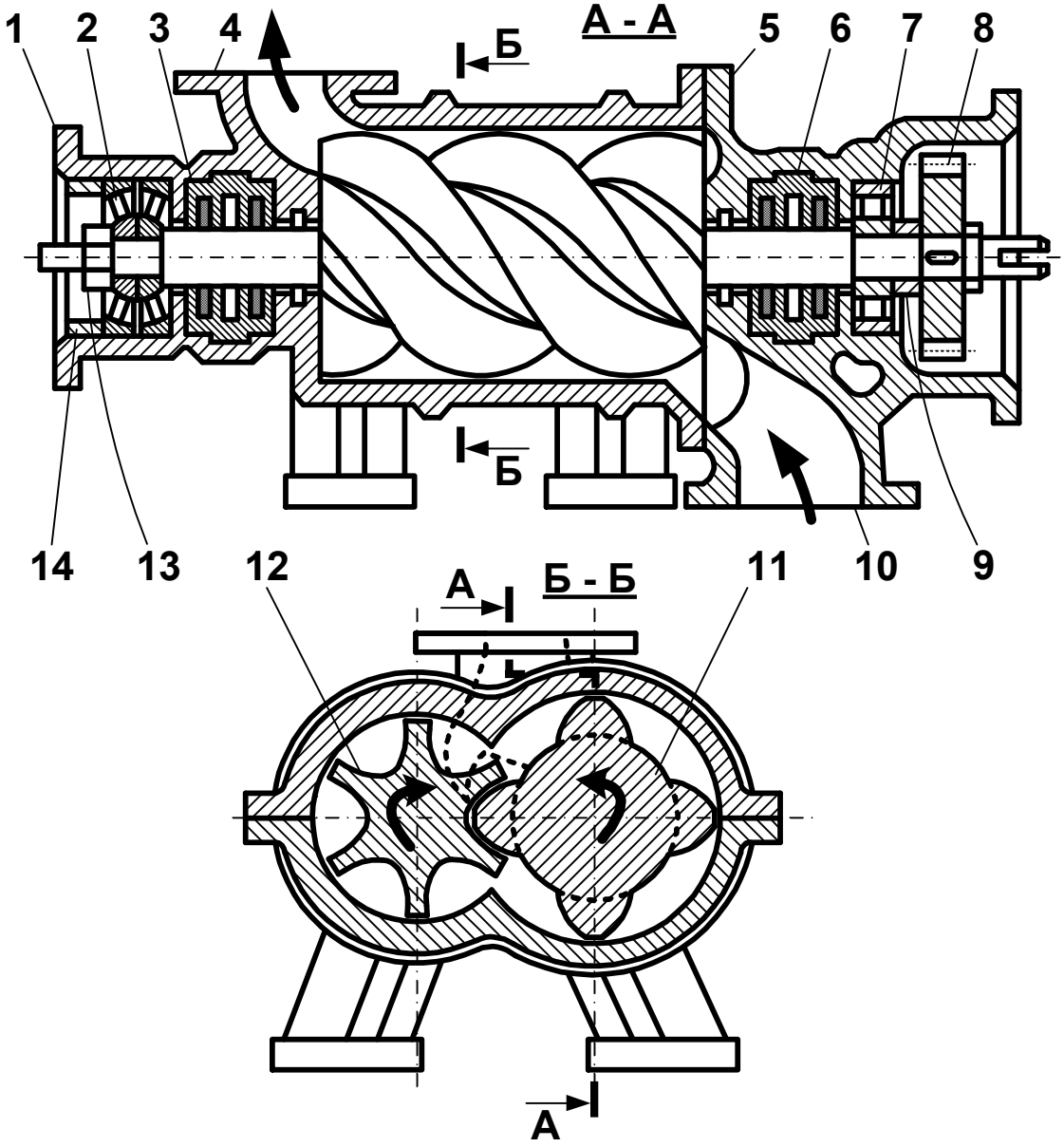


Рис. 3. Винтовой компрессор:
1 – корпус; 2 – задний упорный подшипник; 3 и 6 – сальниковые уплотнения, заднее и переднее; 4 и 10 – патрубки, нагнетательный и всасывающий; 5 – передний фонарь; 7 – передний радиальный подшипник; 8 – синхронизирующая шестерня; 9 – дистанционная втулка; 11 и 12 – ведущий и ведомый ротор; 13 и 14 – стопорные гайка и втулка.

Рабочий процесс винтового компрессора состоит из четырех фаз: всасывания, переноса, сжатия, нагнетания.

Воздух через всасывающий патрубок и окно поступает в винтовые каналы между роторами и корпусом. С поворотом роторов заполненное пространство увеличивается до тех пор, пока с торцевой стороны, где расположена камера нагнетания, зубья не выйдут из зацепления полностью, что и характеризует окончание фазы всасывания.

При дальнейшем повороте роторов полость между зубьями перейдет через кромку всасывающего окна, ее соединение с этим окном прекращается, газ оказывается в изолированной полости и без изменения замкнутого объема парной полости переместится на некоторый угол, фаза переноса, и затем начнется сжатие.

При дальнейшем повороте роторов линия зацепления между зубьями перемещается к торцевой стороне нагнетательного окна. Уменьшение объема парной полости приведет к росту давления, которое будет продолжаться до тех пор, пока полость сжатия не соединится с окном нагнетания. В этот момент фаза сжатия заканчивается.

При сообщении полости сжатия с нагнетательным окном дальнейший поворот роторов приводит к выталкиванию сжатого газа через нагнетательный патрубок в концевой холодильник или в сеть. Величина давления газа, сжимаемого винтовым компрессором, зависит от размеров окна нагнетания: с уменьшением его размеров давление увеличивается.

В компрессорах сухого сжатия конструкция корпуса более сложная, чем у маслозаполненных, так как в нем расположены полости и каналы водяной рубашки. Поднять давление более чем в 5 раз в одной ступени сжатия на этих компрессорах невозможно. Установки с машинами сухого сжатия включают компрессор, мультипликатор, электродвигатель, холодильники, запорную и регулирующую арматуру, глушители шума, а также системы: водяного охлаждения, смазки, автоматического управления и защиты.

В маслозаполненных компрессорах зазоры в 2 раза меньше, так как отвод тепла происходит более интенсивно и температурный режим менее напряженный. Кроме того, масло, заполняя зазоры, способствует уменьшению внутренних перетечек воздуха. В них использованы более простые конструкции сальников, так как масло, обладая более высокой вязкостью чем воздух, создает и здесь уплотняющий эффект. Установки с этими компрессорами дополнительно снабжаются системами очистки сжатого воздуха от масла, но не требуют глушителей. Сжатая масловоздушная смесь поступает в холодильник, совмещенный с маслосборником, где отделяется около 90% масла впрыснутого на всасе. Далее воздух поступает в маслоотделитель для повторного, более глубокого отделения его от масла и уже затем нагнетается в воздухопровод для транспортирования к потребителю.

На горных предприятиях получили широкое распространение и хорошо себя зарекомендовали передвижные установки моделей: 6ВКМ-25/8, 6ВКМ-13/8 и ЗИФ-ШВ-5. В обозначении буква В указывает на то, что компрессор винтовой, а буква М – маслозаполненный. Отсутствие в обозначении буквы М указывает, что компрессор сухого сжатия.

По сравнению с поршневыми компрессорами винтовые имеют следующие преимущества: высокую надежность и долговечность из-за отсутствия клапанов и деталей, совершающих возвратно-поступательные движения, и деталей, имеющих трущиеся поверхности; равномерность подачи воздуха, что исключает необходимость в воздухосборниках большой емкости; меньший объем вредного пространства (около 1%); значительно меньшую удельную металлоемкость и габариты установки; полную уравновешенность роторов и, как следствие, отсутствие необходимости в тяжелых фундаментах или жестких рамах.

По сравнению с центробежными компрессорами: отсутствие помпажных зон на рабочей характеристике; незначительное изменение производительности и КПД при изменении в широких пределах степени повышения давления; надежность работы на запыленных газах; возможность сжатия газов с большим содержанием жидкой фазы; нечувствительность к толчкам и ударам.

Винтовые компрессоры в 10-15 раз легче, чем поршневые, и в 3-4 раза, чем центробежные, при той же производительности.

Недостатками этих компрессоров следует считать более низкий КПД, чем у поршневых; снижение экономичности работы при отклонении давления за компрессором (в сети, что характерно для горных предприятий) от номинального; высокая стоимость из-за высокого класса точности обработки профилей винтов; высокий уровень шума при работе, особенно при частоте вращения роторов 15000-18000об/мин.

3. РОТАЦИОННО-ПЛАСТИНЧАТЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Ротационно-пластинчатые компрессоры являются машинами объемного сжатия. Наибольшее применение в промышленных установках нашли компрессоры с 1 и 2 ступенями сжатия. Устройство одноступенчатого компрессора приведено на рис. 4.

Для компрессоров низкого давления цилиндрический литой корпус из чугуна выполняется с камерами водяного охлаждения. Для компрессоров большего давления корпус выполняется из стальной трубы с внешним оребрением для воздушного охлаждения. Всасывающий и нагнетательный патрубки расположены перпендикулярно и ниже оси ротора компрессора. Они направлены в противоположенные стороны. В нижней части корпуса размещаются лапы для крепления к фундаменту. Торцы цилиндра закрыты крышками, одна из которых проходная, а вторая – глухая. В глухой крышке выполнена цилиндрическая расточка для установки подшипника. В проходной крышке выполняется цилиндрическое отверстие для прохода вала, расточка для установки подшипника и уплотнения.

Ротор компрессора собирается из вала, барабана и пластин. Барабан выполняется отдельно из поковки и по горячей посадке устанавливается на вал или изготавливается заодно с валом. В теле барабана фрезеруются продольные пазы радиально или с наклоном в сторону вращения ротора. В эти пазы закладываются рабочие пластины, высота которых 0,95-0,98 глубины паза. Ротор опирается на радиальные подшипники качения, которые установлены в боковых крышках корпуса компрессора.

Ротор установлен в корпусе компрессора эксцентрично до касания поверхностью барабана в нижней точке поверхности цилиндрической расточки корпуса. Наружная поверхность барабана и цилиндрическая расточка корпуса образую в поперечном сечении зазор в форме серпа или месяца. При вращении ротора пластины под действием центробежных сил постоянно прижаты внешними торцами к внутренней поверхности цилиндра. Каждая соседняя пара пластин вместе с участками внутренней поверхности цилиндра и наружной поверхности ротора образует меняющуюся замкнутую рабочую полость, заполненную сжимаемым газом. Объем рабочей полости изменяется при вращении из-за эксцентричной посадки ротора в цилиндр корпуса компрессора; в результате этого осуществляется рабочий процесс компрессора.

Фаза всасывания продолжается пока рабочая лопатка проходит сектор от точки «d» до точки «a» – всасывающее окно, где она максимально выходит из паза в верхнем положении на величину двойного эксцентриситета.

Фаза сжатия продолжается пока лопатка проходит сектор от точки «a» до точки «b», где происходит постепенное ее погружение в паз ротора. Точка «b» является верхней кромкой нагнетательного окна.

Фаза нагнетания сжатого воздуха в сеть потребителю продолжается пока лопатка проходит сектор от точки «b» до точки «c» – нагнетательное окно, где продолжается ее погружение в паз барабана.

Фаза переноса сжатого воздуха из камеры нагнетания в камеру всасывания продолжается пока лопатка проходит сектор от точки «c» до точки «a», где она максимально погружается в паз ротора. В этом секторе находится вредное или мертвое пространство (зазор между барабаном ротора и цилиндрической расточкой корпуса), которое отрицательно влияет на производительность компрессора. Дополнительно вредное пространство создается свободным объемом паза, который не заполнен пластиной. По мере износа цилиндра и рабочих пластин объем вредного пространства постоянно увеличивается, что сопровождается постепенным уменьшением производительности компрессора.

Между крышками цилиндра и перемещающимися в пазах барабана рабочими пластинами имеются незначительные торцевые зазоры (0,05-0,10 мм на сторону), через которые сжимаемый газ в небольших количествах перетекает из полости высокого давления в полость низкого давления. Уменьшению перетечек газа и повышению КПД компрессора в значительной мере способствует герметизация торцевых зазоров масляной пленкой у компрессоров заполненного типа. У заполненных компрессоров при достаточном количестве масла практически

устраняется снижение производительности из-за вредного пространства, так как масло заполняет эти зазоры.

Рабочие пластины для ротора выполняются, как правило, из легированных сталей и должны иметь гладкую поверхность высокой чистоты. Все остаточные напряжения должны быть сняты термообработкой, что снижает вероятность коробления пластин, сколов на рабочей поверхности и их заклинивания при работе компрессора. Следует устанавливать только калиброванные по толщине пластины с учетом ширины пазов в барабане. Установка рабочих пластин меньшей толщины приводит к увеличению вредного пространства и вероятности их заклинивания в барабане.

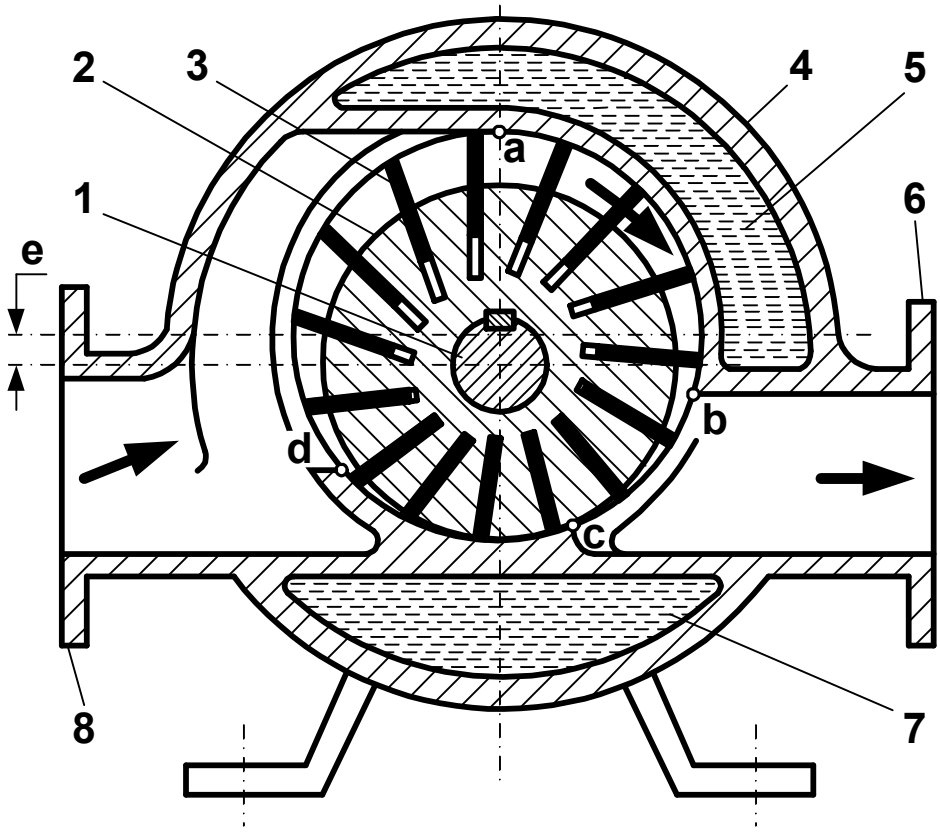


Рис. 4. Поперечное сечение ротационно-пластинчатого компрессора: 1 – вал; 2 – барабан; 3 – пластина; 4 – корпус; 5 и 7 – камеры водяной рубашки, верхняя и нижняя; 6 и 8 – патрубки, нагнетающий и всасывающий; a, b, c, d – характерные точки.

Имеется опыт изготовления и эксплуатации рабочих пластин из асбеста, пропитанного смолами, из текстолита, углеграфита и из других неметаллических антифрикционных материалов. Их использование позволяет увеличить срок службы цилиндра компрессора, так как силы трения этих лопаток о цилиндр в 2-3 раза меньше, чем сталь по стали, но по надежности и качеству изготовления они пока уступают стальным рабочим пластинам.

Вращающиеся разгрузочные кольца, располагаемые по концам ротора (применяемые в крупных и средних ротационно-пластинчатых компрессорах для уменьшения трения пластин о цилиндрическую поверхность корпуса), в машинах малой мощности не применяются, что характерно для передвижных подземных компрессорных установок.

Вал компрессора со стороны двигателя оборудуется концевым уплотнением для предотвращения утечек сжимаемого газа в атмосферу. Обычно это контактное уплотнение торцевого или радиального типа простой и надежной конструкции, что обеспечивает минимальные затра-

ты времени и расходных материалов при эксплуатации и невысокой квалификации обслуги, что не маловажно.

В качестве привода на компрессорах этого типа, произведенных в России, используется, как правило, асинхронные электродвигатели, рассчитанные на запуск при полном напряжении. Компрессор и электродвигатель устанавливаются на общей фундаментной плите и соединяются упругой соединительной муфтой.

За рубежом широкое распространение получила моноблочная конструкция, в которой баран компрессора насажен на вал электродвигателя. Такая компоновка значительно упрощает монтаж компрессора, балансировку его ротора, сокращается расход смазки, увеличивается срок службы подшипников и уплотнений, уменьшается длина и масса компрессора, а также появляется возможность использования специалистов с низкой квалификацией. Существенным недостатком этой компоновки является двигатель специального исполнения.

Несколько отечественных заводов освоили выпуск компрессоров моноблочного исполнения, в которых используются обычные асинхронные двигатели с фланцем для установки на корпусе самого компрессора. Роторы двигателя и компрессора соединяются упругой муфтой, которая располагается в специальной камере корпуса компрессора.

Смазка внутренней поверхности цилиндра, пазов ротора, подшипников и уплотнений осуществляется принудительно циркуляционной системой смазки. Для этого в комплект оборудования компрессорной установки включается насосная станция с маслобаком, системами очистки, охлаждения и автоматического контроля температуры масла на выходе из компрессора и после его охлаждения. На компрессорах средней и большой производительности маслостанция дополнительно оборудуется системой контроля качества масла (содержание воды, кислотность, мутность и другие характеристики). В компрессорах большой производительности для передачи вращения от двигателя используются зубчатые муфты, которые также принудительно смазываются.

Система управления компрессора должна иметь следующие виды защиты:

– по предельному давлению нагнетания сжимаемого газа (предохранительные клапаны);
– по минимальному давлению газа в подводящем патрубке (электроманометр);
– по максимальному и минимальному давлению масла в системе смазки (смотровые окна на маслобаке, реле давления);
– по максимальному и минимальному давлению воды в системе охлаждения (реле давления, открытые сливы);
– по температуре сжимаемого газа, масла и охлаждающей воды (термопары, термореле).

Ротационно-пластинчатые компрессоры ввиду сравнительно невысокой степени повышения давления (оптимальная ее величина для одной ступени ~3,24) получили широкое распространение в качестве вакуум-насосов. В таком применении подобная гидравлическая машина с одной ступенью в состоянии понизить атмосферное давление до 0,005 МПа или в 20 раз. Двухступенчатые форвакуумные насосы способны понизить атмосферное давление газа в закрытой камере в 1000-10000 раз.

Роторно-пластинчатые компрессоры обладают следующими достоинствами: компактность и простота конструкции при относительно высокой производительности, отсутствие всасывающих и нагнетательных клапанов и высокая динамическая уравновешенность, равномерность подачи сжатого воздуха в сеть потребителю.

Недостатками этих компрессоров являются: большие потери энергии на трение и износ рабочей поверхности цилиндра, разгрузочных колец и пластин; трудность повышения герметичности при высоких давлениях; необходимость высокой точности обработки и сборки. Эти недостатки ограничивают в первую очередь относительные скорости трущихся поверхностей (15–20 м/с), производительность и конечное давление, которое не превышает 1,2 МПа для современных отечественных компрессоров этого типа.

4. ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ (ВОДОКОЛЬЦЕВЫЕ)

Жидкостно-кольцевой компрессор является одноступенчатой гидравлической машиной объемного действия. Устройство компрессора представлено на рис. 5.

Чугунный корпус с центральной цилиндрической расточкой закрыт с двух сторон торцевыми крышками. В нижней части корпус имеет четыре лапы, которыми компрессор опирается на раму или фундамент. Каждая торцевая крышка имеет патрубок, фланец которого расположен горизонтально и выше оси компрессора. Крышка с всасывающим патрубком проходная – имеет центральное отверстие для вывода приводного конца ротора из корпуса компрессора. Крышка с напорным патрубком глухая. На внутренней поверхности каждой крышки выполнены цилиндрические расточки для установки подшипников и уплотнений. Крышки крепятся к корпусу по фланцу через прокладку из термостойкой резины толщиной до 2 мм. При установке торцевых крышек патрубки должны быть направлены вверх. Со стороны всасывающего патрубка в нижней части корпуса выполнен канал в цилиндрическую расточку, по которому подается охлаждающая вода в направлении вращения ротора. Со стороны напорного патрубка в нижней части корпуса выполнен канал, по которому из цилиндрической расточки отводится охлаждающая вода в направлении вращения ротора.

Ротор компрессора имеет разборную конструкцию. Он состоит из вала, рабочего колеса лопастного типа, шпонки, стопорной гайки и радиальных подшипников. В цилиндрической расточке корпуса ротор устанавливается эксцентрично так, что между концом лопатки рабочего колеса и рабочей поверхностью цилиндра в верхней точке остается радиальный зазор не более 1мм. При вращении ротора его лопасти захватывают жидкость и отбрасывают ее к стенке цилиндра. Она вращаясь вместе с ротором образует вращающееся жидкостное кольцо. В качестве рабочей жидкости на горных предприятиях используется вода. Между барабаном ротора и водяным кольцом образуется серповидное рабочее пространство.

Рабочий процесс в этом компрессоре включает последовательное выполнение четырех фаз: всасывание, перенос, сжатие, выталкивание сжатого воздуха в сеть. Всасывание атмосферного воздуха происходит через патрубок 3 в камеру А вдоль оси цилиндра (всасывающее окно расположено в торцевой крышке). Перенос атмосферного воздуха происходит после завершения всасывания при повороте ротора примерно на 80-90°. Сжатие воздуха происходит в камере В, из которой затем газ выталкивается через нагнетательное окно и патрубок 4 в сеть.

Количество воды в цилиндре компрессора должно быть достаточным для исключения зазора между втулкой рабочего колеса и жидкостным кольцом в зоне между камерами нагнетания и всасывания, чтобы избежать образования вредного пространства. Избыточное количество воды в цилиндре приводит к снижению производительности компрессора.

Лопатки ротора не касаются поверхности цилиндра, в результате чего отсутствуют потери энергии связанные с износом их рабочих поверхностей. В этом заключается смысл применения жидкостного кольца, а кроме того, жидкость в компрессоре служит для охлаждения сжимаемого газа и уплотнения зазоров.

Для интенсивного отвода тепла постоянно необходимо подавать холодную воду в цилиндр, а ее избыток отводится через дренажное отверстие. Жестких требований по качеству охлаждающей воды нет. Здесь может быть использована питьевая вода из городских сетей. Наличие в зоне сжатия воды обеспечивает практически изотермическое повышение давления, а также интенсивную конденсацию паров и вывод механических примесей, содержащихся в сжимаемом газе. Поэтому после компрессора нет необходимости устанавливать охладитель сжатого газа и влагомаслоотделитель, что значительно упрощает установку и позволяет размещать ее на меньших площадях. При циркуляционной схеме использования воды для работы компрессора следует подвергать ее очистке на механических фильтрах и Na-катионированию.

Одноступенчатые жидкостно-кольцевые компрессоры способны создавать давление до 0,25-0,50 МПа при производительности 0,2-400 $м^3$/мин и частоте вращении ротора до 3000 об/мин.

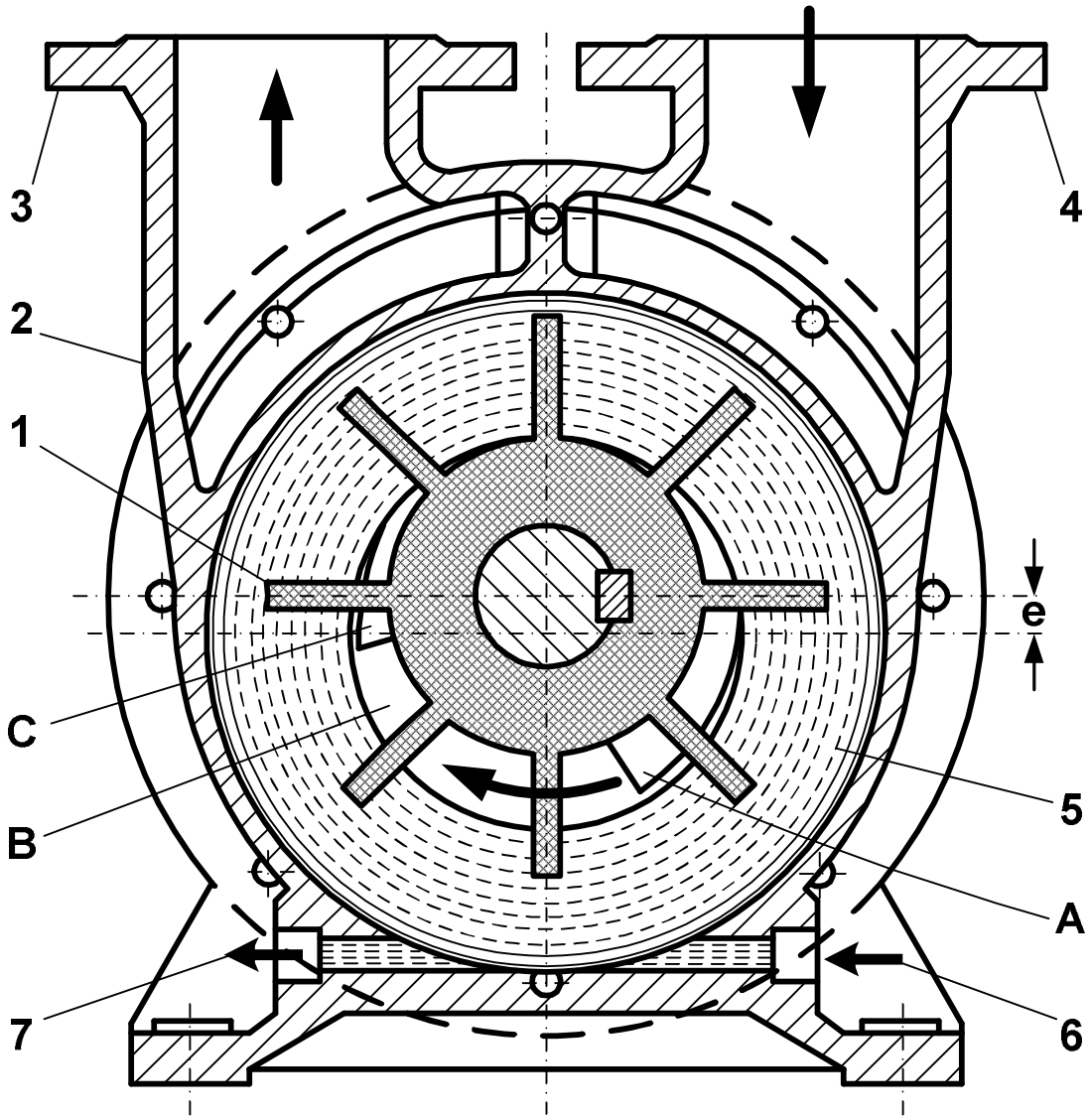


Рис. 5. Поперечное сечение жидкостно-кольцевого компрессора:
1 – ротор; 2 – корпус; 3 и 4 – нагнетательный и всасывающий патрубок; 5 – вращающееся жидкостное кольцо; 6 и 7 – подвод и отвод охлаждающей воды; А – камера всасывания, В – камера сжатия, С – камера нагнетания.

Достоинствами этих компрессоров следует считать: простата конструкции и эксплуатации; низкая стоимость изготовления; высокая надежность, низкий уровень шума; отсутствие масла в сжимаемом газе; отсутствие трущихся элементов в полости цилиндра, простота герметизации, изотермическое сжатие; высокий объемный КПД; возможность с высоким уровнем безопасности откачивать (режим вакуум-насоса) и сжимать токсичные, взрывоопасные, легкоразлогающиеся, полимеризующиеся и воспламеняющиеся газы, пары и жидкостно-газовые смеси, в том числе агрессивные и содержащие механические примеси.

Единственным недостатком компрессора является низкий общий КПД, так значительная доля энергии затрачивается на гидравлические потери, обусловленные турбулентным режимом движения слоев в жидкостном кольце.

Использование жидкостно-кольцевых компрессоров в качестве вакуум-насосов позволяет в шахтах производить интенсивное принудительное разгазовывание пластов, на тепловых и электрических станциях для обезвоживания в бункерах сырого топлива, в химии и в обрабатывающих отраслях для предварительного снижения влажности исходного сырья, так как они обеспечивают разрежение до 98%.