

14457534

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э.Баумана

НЕ НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

БОНДАРЕНКО Михаил Данилович

УДК 539.893;621.512,621.658

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ СЖАТИЯ ГАЗОВ ДО 1,5-2,0 ГПа (15-20 КБАР)
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 0,2-0,5 л/час сжатого газа

Специальность 05.04.06 -
вакуумная и компрессорная техника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук
в форме научного доклада

Москва - 1987

Работа выполнена в Институте геохимии и физики минералов
АН УССР.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Лубенец В.Д.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Шерстюк А.Н.;
кандидат технических наук,
доцент Ардашев В.И.

Ведущая организация - Ордена Трудового Красного Знамени
Институт сверхтвердых материалов
АН УССР.

Защита состоится "1" июня 1987 г. в 16 часов
на заседании специализированного Совета К.053.15.07 Московского
высшего технического училища им. Н.Э.Баумана (Москва, 107005,
2-я Бауманская, 5).

С диссертацией в форме научного доклада можно ознакомиться
в библиотеке Московского высшего технического училища
им. Н.Э.Баумана.

гект 1987 года.

mf
В.Н.Мозлов

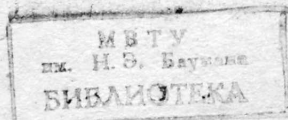
M454538

Актуальность тем. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" по ускорению научно-технического прогресса сказано, что заметное место займут принципиально новые технологии, в том числе, технологии с использованием сверхвысоких давлений, которые принесут крупный экономический эффект.

В настоящее время ощущается большой спрос на аппаратуру высокого давления до 1,5-2,0 ГПа (15-20 кбар), в которой средой, передающей давление, является чистый газ, вследствие ее широкой универсальности и больших возможностей, как для научных изысканий по изучению поведения вещества в экстремальных условиях, так и для реализации прогрессивных технологических процессов, таких как: управляемый синтез минералов с наперед заданными свойствами, горячее изостатическое прессование и газовая экструзия промышленно важных тугоплавких материалов. Наиболее сложной и трудоемкой научно-технической задачей решения проблемы является создание конструктивно простых, надежных в эксплуатации источников высокого давления для получения чистого газа до 1,5-2,0 ГПа, из-за большой сжимаемости и исключительно низкой вязкости газа.

Целью работы является проведение комплекса экспериментальных научных исследований для создания источников высокого газового давления для сжатия газов и газовых смесей до 1,5-2,0 ГПа и выше производительностью 0,2-0,5 л/час сжатого газа без путного загрязнения газа в процессе компримирования.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи: 1. Определить диапазон давлений, при которых целесообразно применять газ как среду, передающую давление. 2. Разработать стенд для изучения сжатия газов до 1,5-2,0 ГПа. 3. Исследовать процесс сжатия аргона с учетом его физического состояния. 4. Определить количество ступеней сжатия газов до их затвердевания. 5. Исследовать эластичные мембраны для получения высокого давления газов. 6. Разработать устройство и исследовать нагрев корпуса мембранной головки при сжатии газов. 7. Исследовать характер деформации уплотнения, а также прочность мультипликатора и мемб-



ранной головки. 8. Разработать простые и удобные в эксплуатации конструкции мембранной головки для сжатия газов до 200 МПа и дожимающего мультипликатора на давление до 1,5-2,0 ГПа. 9. Предложить обоснованные методы сжатия газов в перспективе выше 1,5-2,0 ГПа.

Научная новизна работы. 1. Определен диапазон давлений целесообразности применения газов как среды, передающей давление. 2. Получены экспериментальные данные процесса сжатия аргона вплоть до его затвердевания при комнатной температуре, показана аналогия сжатия аргона и бензина после 200 МПа (2 кбар). 3. Определены утечки аргона в уплотнении в процессе его сжатия до затвердевания (1,41 ГПа). 4. Доказана целесообразность двухступенчатого сжатия газов от 4-15 МПа (40-150 бар) вплоть до их затвердевания. 5. Исследована работа эластичной мембраны в процессе сжатия газа на прозрачной модели. Определена геометрия и способ крепления эластичной мембраны. Доказана возможность применения резиновых мембран для получения высоких газовых давлений. 6. Изучен нагрев корпуса мембранной головки при сжатии аргона и гелия в различных режимах. 7. Исследованы характер деформации уплотнения, а также прочность мембранной головки и мультипликатора. 8. Обоснованы методы получения газовых давлений в перспективе выше 1,5-2,0 ГПа. В целом решена одна из актуальных научно-технических задач - получение высокого газового давления.

Практическая ценность работы. На основании проведенных исследований разработаны новые оригинальные конструкции мембранной головки, сосуда высокого давления, уплотнения и на их основе созданы простые, надежные и удобные в эксплуатации источники высокого газового давления для сжатия газов и газовых смесей до 1,5-2,0 ГПа и выше.

Промышленная реализация результатов. В народное хозяйство внедрены и выпускаются малыми партиями (3-5 штук в год) для оснащения различных предприятий и учреждений мембранные компрессоры для сжатия газов до 200 МПа и три источника высокого газового давления (1,5-2,0 ГПа) по Постановлению Государственного комитета по науке и технике № 150 от 11 апреля 1975 г., № гос. регистрации 7053373 и Постановлениям Президиума АН УССР № 163 от 12 апреля 1974 г., № 52 от 9 февраля 1976 г., № 81-Б от 23 февраля 1977 г., № 456 от 3 декабря 1977 г., № 537 от 28 декабря

1979 г., № 535-Б от 28 декабря 1982 г., № 489-Б от 30 декабря 1985 г.

Апробация работы. Основные результаты исследований и разработок доложены на I Всесоюзном совещании по физике и технике высоких давлений, Донецк, 1973 г.; У Международной конференции по физике и технике высоких давлений, Москва, 1975 г.; I, II, III, IV, V, VI, VII и VIII республиканских научных семинарах "Влияние высокого давления на вещество", Киев, 1976 г.; Киев, 1977 г.; Кацивели, 1978 г.; Кацивели, 1979 г.; Одесса, 1980 г.; Кацивели, 1981 г.; Канев, 1982 г.; Киев, 1983 г.; Всесоюзном симпозиуме "Экспериментальные исследования при высоких газовых давлениях", Черногоровка, 1977 г.; Всесоюзном научно-техническом семинаре "Оптимизация конструкции и моделирование процессов поршневых и центробежных компрессоров высокого давления", Сумы, 1978 г.; I и II Всесоюзных конференциях "Гидростатическая обработка материалов", Донецк, 1979, 1981 г.г.; Всесоюзной научно-технической конференции (юбилейной) "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении. Раздел энергомашиностроение", Москва, МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1980 г.; Всесоюзном симпозиуме "Современная техника и методы экспериментальной минералогии", Черногоровка, 1983 г.; Межреспубликанской школе-семинаре "Научприбор-84", Сухуми, 1984 г.

Публикация работы. По диссертации опубликовано 52 печатные работы, из них 5 изобретений, один промышленный образец, написан один научный отчет.

Разработанные автором мембранный компрессор и газостат демонстрировались на Выставке достижений народного хозяйства Украинской ССР, Киев, 1977, 1978 г.г., отмечены двумя дипломами Выставки.

Объем работы. Диссертация в форме научного доклада состоит из анализа состояния вопроса и основных задач работы, двух частей; первой по исследованию и второй по созданию компрессоров высокого газового давления, общих выводов, содержит 16 страниц, в том числе I таблицу, 6 рисунков, список основных публикаций автора из 18 наименований.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Благодаря синтезу искусственных алмазов, боразна, гексони-

та-Р в твердой фазе в настоящее время с опережением развиваются исследования при квазигидростатических давлениях, где средой, передающей давление, является твердое пластичное тело. В квазигидростатике уже достигнуты давления до 200 ГПа (2 Мбар). Создана сравнительно надежная аппаратура как за рубежом, так и отечественная, позволяющая получать достоверные данные о влиянии давления на вещество в интервале давлений от 1,5-2,0 ГПа до 10 ГПа и выше. Однако твердофазовая аппаратура имеет общий недостаток - наличие большого градиента давления в области образца, ориентированная деформация образца, сложность измерения давления и управления им, сложность создания и контроля равномерного температурного поля. Особенно эти недостатки ощутимы в интервале давлений от 0 до 1,5-2,0 ГПа.

Свободна от этих недостатков газовая аппаратура, но с учетом больших технических трудностей высокие газовые давления в настоящее время целесообразно применять в сравнительно ограниченном диапазоне давлений (см.табл.) - до 200-300 МПа для горячего изостатического прессования тугоплавких материалов, до 1,5-2,0 ГПа для научных исследований, в перспективе, газовые давления до 3-4 ГПа и выше можно рекомендовать для изучения вещества в экстремальных условиях, синтеза некоторых веществ.

Среда, передающая давление в зависимости
от давлений и температур

Диапазон : давлений, :		Диапазон температур, °С			
МПа·10 ² (кбар)		-273 - 0 :	0 - 400 :	400 - 1300 :	1300 - 2500 и выше
0 - 15	ГАЗ (жидкий гелий, жидкий азот)	ЖИДКОСТЬ (вода, силиконовые масла)	ГАЗ (аргон, гелий) ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР	ГАЗ (аргон, гелий)	
15 - 40	ГАЗ (жидкий гелий, жидкий водород)	ЖИДКОСТЬ (вода, пар)	ГАЗ (азот, аргон, гелий)	ГАЗ (аргон, гелий)	
ТВЕРДОЕ ПЛАСТИЧНОЕ ТЕЛО					
40 - 100 и выше	ТВЕРДОЕ ПЛАСТИЧНОЕ ТЕЛО				

Главным тормозом в решении вышеуказанных задач является от-

сутствие надежных источников для сжатия газов без загрязнения до 1,5-2,0 ГПа как в СССР, так и за рубежом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОГО ГАЗОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Для изучения процесса сжатия газов, а также исследования основных частей дожимающего мультипликатора разработан стенд (рис.1), защищенный авторским свидетельством № 582479, который состоит из мультипликатора I, калиброванного объема с мембраной 2, баллона с рабочим газом 3, управляемых клапанов 4 и 5, гидроклапана высокого давления 6, манометров 7-9 и манганинового датчика 10. Шток мультипликатора снабжен индикатором перемещения 11. Давление в калиброванном объеме под мембраной и под большим поршнем мультипликатора создается гидравлическим насосом НГР-2000 13 и 14. Мультипликатор и калиброванный объем оборудованы термостатами 15..

Особенностью стенда является наличие калиброванного объема с мембраной, который служит как для предварительного сжатия газов до 200 МПа, так и для контроля утечек рабочего газа после сжатия его в мультипликаторе и возврата в калиброванный объем. Калиброванный объем с мембраной, установленные перед мультипликатором, позволяют повысить точность проводимых исследований на стенде.

Стенд оборудован сосудом высокого давления 12 (авторское свидетельство № 712581).

Процесс сжатия газа до 1,5-2,0 ГПа изучался с целью определить величину предварительного давления, необходимого для дальнейшего сжатия газа во второй ступени - мультипликаторе, а также уточнить количество ступеней источника высокого давления. В качестве исследуемого газа выбран аргон, как наиболее дешевый и доступный инертный газ. Для получения более высоких давлений можно рекомендовать гелий, который обладает малой тепловой конвекцией, но более дорогой. Сжатие аргона изучалось в сравнении со сжатием бензина.

На рис.2 показан график роста давления бензина и аргона на выходе стенда при постоянной производительности гидравлики 2,6 л/час сжатого масла до 200 МПа (2 кбар).

График роста давления бензина представляет собой почти прямую линию. Кривая роста аргона значительно отличается от первой в нижней части до 200 МПа, выше этого давления обе линии почти

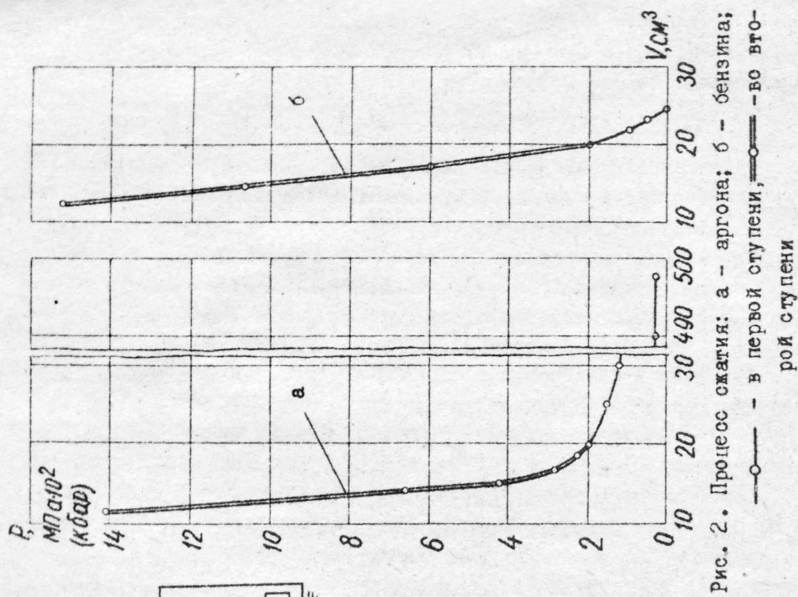


Рис. 2. Процесс сжатия: а - аргона; б - бензина;
—○— в первой ступени, — во вто-
рой ступени

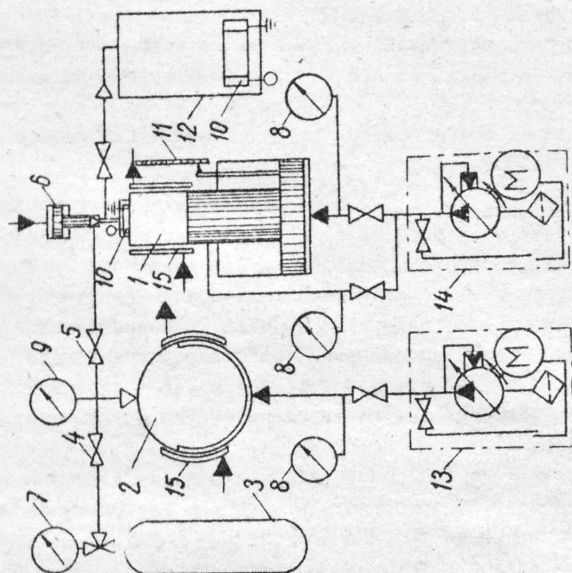


Рис. 1. Принципиальная схема
испытательного стенда

параллельны.

Анализ кривой процесса сжатия аргона свидетельствует, что наибольший ее изгиб соответствует давлению ~ 200 МПа, то есть давлению, выше которого сжимаемость и плотность аргона, а также и других газов приближается к жидкостям. Однако при этом давлении аргон ведет себя как газ, и не фиксируется его переход в другое состояние. При достижении давления $1,41$ ГПа аргон переходит в твердое состояние, наблюдается скачек объема, давление в приемном сосуде перестает расти, так как твердый аргон не проходит через соединительные капилляры, манганиновый датчик давления, находящийся непосредственно в камере сжатия, как правило, выходит со строя (обрывается) от одвиговых напряжений в затвердевшем аргоне.

Таким образом, из экспериментальных данных, полученных на стенде при изучении процесса сжатия аргона следует: 1. Оптимальным исходным давлением для второй ступени – мультипликатора является давление, равное ~ 200 МПа. 2. Для оптимального варианта источника высокого газового давления с учетом большей сжимаемости газа до 200 МПа производительность гидропривода первой ступени, мембранного компрессора, должна быть в 5–7 раз выше производительности гидропривода мультипликатора. 3. Достаточно двух ступеней для сжатия аргона до затвердевания ($\sim 1,41$ ГПа) при давлении на входе 4–15 МПа. 4. Дальнейшее повышение давления аргона возможно при нагревании.

Исследование работы уплотнения штока мультипликатора проведено на уплотнении с автоподжатием с целью определения основных конструктивных соотношений и размеров отдельных деталей уплотнения при давлении аргона до $1,5$ ГПа.

На рис.3.I показан схематический чертеж уплотнения. Основным условием надежной работы уплотнения является соотношение

$$P_{\text{упл.}}/P_{\text{газа}} = 1,20$$

Это соотношение установлено нами опытным путем для многих газов и жидкостей, оно справедливо также для аргона на давления до $0,5$ ГПа (5 кбар) и достигается соотношением сил Q и Q_2 , уравновешенных силой Q_1 в процессе рабочего цикла мультипликатора.

На рис.3.II показан характер деформации прокладок уплотнения в процессе многократного сжатия аргона до $1,4$ ГПа. Путем анализа деформации уплотнения при различных зазорах сопрягаемых

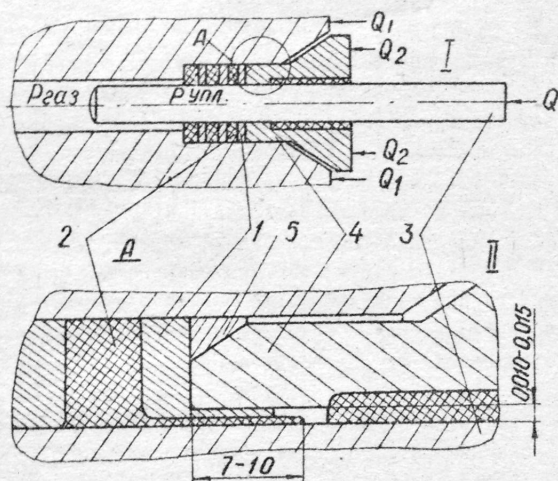


Рис. 3. Уплотнение с автоподжатием.

I - схематический чертёж; II - характер деформации прокладок

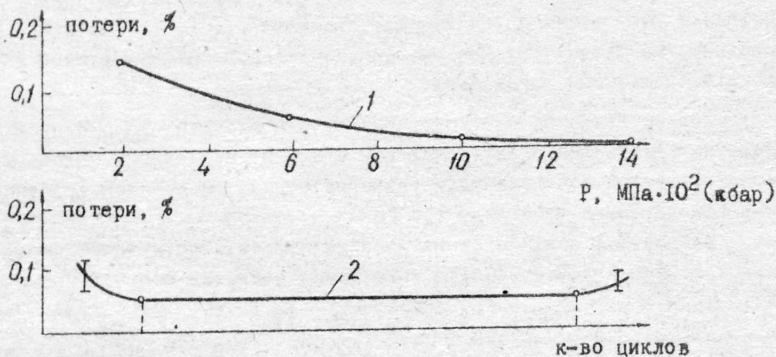


Рис. 4. График потерь аргона в уплотнении.

I - цикл сжатия; 2 - длительная работа

деталей для материала прокладок из луженой латуни I и фторопласта 2 определен оптимальный зазор между штоком 3 и запирающим кольцом 4, равный 0,010-0,015 мм. Длина кольца, сопрягаемого со штоком, для диаметра 16 мм рекомендуется не менее 20 мм. Для предотвращения выдавливания прокладок в зазор между цилиндром и запирающим кольцом нами рекомендовано экструзионное кольцо 5 из закаленной стали.

Разработанная нами методика определения потерь рабочего газа в уплотнении основана на определении количества газа в калиброванном объеме до и после сжатия газа в мультипликаторе. На рис. 4 показан график 1 потерь аргона в уплотнении в процессе цикла сжатия и 2 - при длительной работе. Потери аргона в процессе сжатия уменьшаются с увеличением давления и при достижении давления 1,41 ГПа (точка затвердевания газа) практически равны 0.

Таким образом, соотношение $P_{упл.}/P_{газа}$ для давлений аргона 1,0-1,4 ГПа можно уменьшить до 1,10-1,12 с целью более рационального использования прочностных возможностей материалов деталей мультипликатора для сжатия аргона. В процессе ресурсных испытаний установлен предел надежной работы уплотнения без замены прокладок, равный не менее 300-500 циклов (рис. 4, график 2).

Перемещение эластичной мембраны, примененной впервые для высоких давлений, изучено на прозрачной модели мембранной головки. Определено исходное положение мембраны, при котором увеличивается срок ее службы и обеспечивается максимальная производительность компрессора.

Исследование нагрева корпуса мембранной головки проведено при сжатии аргона и гелия в двух режимах: 4 цикла в час и 20 циклов в час. При нагреве газа в процессе сжатия ($\sim 60^{\circ}\text{C}$) часть тепла отводилась на корпус мембранной головки, который нагревался до $40-45^{\circ}\text{C}$ в течение 20-30 мин., после чего температура нагрева корпуса стабилизировалась. Наибольший перепад температуры по толщине корпуса наблюдался в начале работы компрессора и составлял не более 15°C . При сжатии гелия корпус головки нагревался меньше на $5-10^{\circ}\text{C}$.

Нагрев частей мембранной головки в процессе сжатия аргона и гелия в исследованных режимах практически не оказывает влияния на прочность и работоспособность корпуса и других деталей головки и нет необходимости в их дополнительном охлаждении. Меньший

нагрев корпуса мембранной головки в процессе сжатия гелия объясняется меньшей теплоотдачей или тепловой конвекцией гелия.

Испытанию на прочность подверглись основные узлы - мультипликатор и мембранная головка. Мультипликатор разрушен на испытательном стенде при давлении $\sim 3,0-3,2$ ГПа ($\sim 30-32$ кбар). Характер разрушения штока свидетельствует о том, что разрушилась часть штока, находящаяся вне камеры сжатия, то есть, не подвергнутая всестороннему давлению. Для увеличения несущей способности штока ему необходима поддержка механическая или гидростатическая. Рабочее давление мультипликатора без поддержки штока составляет $1,5-2,0$ ГПа.

Мембранная головка нагружалась на давление 250 МПа до упруго-пластической деформации корпуса головки, при этом корпус головки автофретировался, упрочнялся, после чего надежно работал на давления до 200 МПа.

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОГО ГАЗОВОГО ДАВЛЕНИЯ

При разработке конструкции источника высокого газового давления для сжатия газов до $1,5-2,0$ ГПа, в основном использовались экспериментальные данные, полученные автором на испытательном стенде.

На рис.5 показана принципиальная схема источника высокого газового давления. В качестве первой ступени принят разработанный нами мембранный компрессор I. Для дожатия газа во второй ступени до $1,5-2,0$ ГПа использовался многоходовой мультипликатор 2, в котором применено уплотнение с автоподжатием.

Газ от баллона давлением $4-15$ МПа, предварительно очищенный в фильтрах II в первую и вторую ступени напускается через гидроклапаны 3, управляемые вентилями 4 от насосов 5. Давление в мембранном разделителе и под большим поршнем мультипликатора создается насосами 6 с регулируемой производительностью НГР-2000. Давление в первой ступени измеряется манометром 7, а на выходе установки - манганиновым датчиком 8. Мембранный разделитель и мультипликатор с управляемыми гидроклапанами позволяют производить любое количество рабочих циклов, что обеспечивает создание давления в довольно больших объемах, а также вести подкачку в процессе работы.

Техническая характеристика источника: давление газа на выходе - $1,5-2,0$ ГПа, производительность - $0,2-0,3$ л/час сжатого

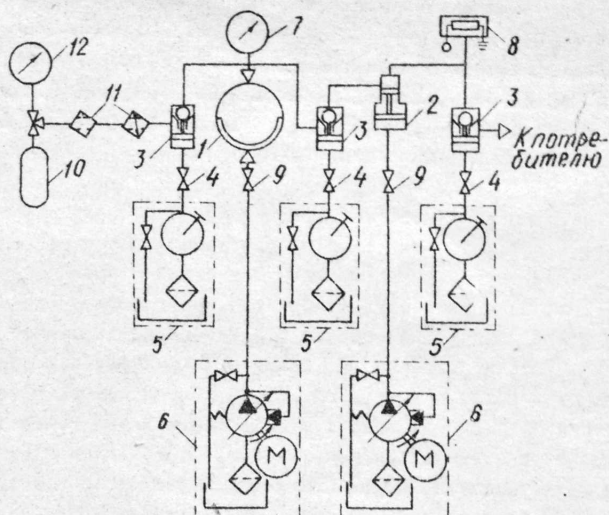


Рис. 5. Принципиальная схема источника давления для сжатия газов.
9 - вентиль; 10 - баллон; 12 - манометр

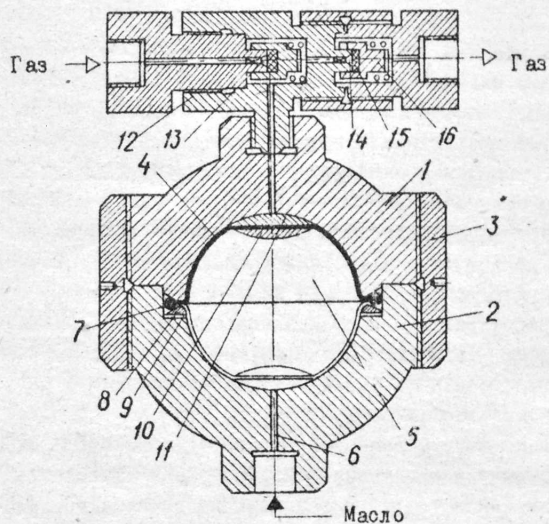


Рис. 6. Конструкция мембранной головки

газа до 1,5 ГПа, потребляемая мощность при этом составляет 1,5 квт.

Наиболее сложно сжимать газ до 200 МПа, так как в этом пределе давлений он обладает наибольшей сжимаемостью и самой малой вязкостью. Нами разработана оригинальная конструкция мембранного компрессора, защищенного авторским свидетельством № 395618.

На рис.6 показан чертеж головки мембранного компрессора, которая содержит разъемный корпус, состоящий из верхней 1 и нижней 2 полусфер, скрепленных стяжкой 3 с левой и правой резьбой. В корпусе помещена резиновая мембрана 4, разделяющая его внутреннюю шаровую полость на газовую 5 и гидропривода 6. Место разъема корпуса уплотнено резиновым кольцом 7 круглого сечения, состоящим из одного целого с мембраной. На периферии мембраны, в области уплотнения, ставится кольцо 8 с каналами 9 для сообщения зоны уплотнения с полостью гидропривода. В центральной части мембраны для предотвращения выдавливания резины в отверстия закреплены клеем на базе эпоксидной смолы ЭД-5 с добавлением пластификатора металлические сегменты 10, 11. В верхней полусфере установлена клапанная коробка 12 с всасывающими 13 и нагнетательными 14 клапанами.

Обратные клапаны являются комбинацией конусных клапанов обычного типа с мягким (резина, фторопласт, фибра) уплотнением 15, помещенным в оправу 16, подогнанную по корпусу с зазором не более 0,01-0,02 мм для предотвращения выдавливания уплотнения в зазоры между корпусом и оправкой в момент обрабатывания клапанов.

Основным отличием разработанного мембранного компрессора от известных конструкций подобного типа является наличие на периферии мембраны кольца с каналами для сообщения зоны уплотнения с гидроприводом для уравнивания давления со стороны торца мембраны и предотвращения контакта сжатого газа с уплотнением, что способствует увеличению срока службы мембраны, улучшению работы уплотнения, поднятию верхнего предела выходного давления компрессора и надежности его работы.

Учитывая высокую надежность в работе, простоту в эксплуатации первой ступени мембранного компрессора, а также большой спрос различных министерств и ведомств на компрессора для сжатия газов до 200 МПа без загрязнения в процессе компримирования, нами разработан промышленный образец мембранного компрессора (сви-

детельство на промышленный образец № 5730) для сжатия газов до 200 МПа, эргономические показатели которого соответствуют современным требованиям.

Техническая характеристика мембранного компрессора: давление газа на выходе - 200 МПа, производительность - 0,5 л/час сжатого газа до 200 МПа при потребляемой мощности 1,5 квт.

Сжатие газов выше 1,5-2,0 ГПа. На основании проведенных автором исследований с учетом достижений как за рубежом, так и в СССР, на базе разработанных нами источников высокого газового давления в перспективе возможно создание надежных источников для сжатия газов до 3 ГПа (30 кбар) в третьей ступени с подогревом, а также до 5 ГПа (50 кбар) и выше путем ввода газа давлением 1,0-1,5 ГПа в капсулы, помещенные в твердофазовые аппараты с последующим подогревом и дожатием газа до 5 ГПа и выше.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате анализа состояния задачи и технических возможностей определен верхний предел целесообразности применения газовых давлений, равный 1,5-2,0 ГПа, в перспективе - 3-4 ГПа и выше.

2. Разработан оригинальный экспериментальный стенд для исследования процесса сжатия газа и испытания основных узлов источника газового давления. Погрешность измерения давления на стенде не более 0,1%.

3. Получены экспериментальные данные процесса сжатия аргона вплоть до его затвердевания (1,41 ГПа). При анализе кривой сжатия определена характерная точка наибольшего изгиба кривой, соответствующая давлению ~ 200 МПа. После 200 МПа аргон, а также и другие газы имеют плотность и сжимаются как жидкости. Достаточно одной ступени для сжатия газов от 200 МПа вплоть до их затвердевания. Дальнейшее повышение давления газов целесообразно проводить с подогревом.

4. Экспериментально исследованы утечки аргона в уплотнении, которые с увеличением давления уменьшаются и при давлении 1,41 ГПа практически равны нулю. Это исследование позволяет уменьшить коэффициент некомпенсации с 1,20 до 1,10 при давлении аргона от 0,5 ГПа до 1,5 ГПа и повысить несущую способность газового мультипликатора на 10%.

5. Исследована деформация уплотнения с автоподжатием. Эко-

периментально определен зазор затвора уплотнения, который для давления аргона до 1,5 ГПа равен 0,01-0,015 мм. Длина сопрягаемой части затвора не зависит от диаметра затвора и равна не менее 20 мм.

6. Впервые предложена и исследована эластичная мембрана из резины для сжатия газов до 200 МПа и выше. Определено исходное положение мембраны выпуклостью к газовой полости, обеспечивающее максимальную производительность и надежность мембраны.

7. Изучен на разработанном устройстве нагрев корпуса мембранной головки при сжатии аргона в режиме работы компрессора 4 и 20 циклов в час. Определен наибольший перепад температуры по толщине стенки корпуса и максимальный нагрев корпуса, которые составляют соответственно не более 15°C и 45°C. Нагрев мембранной головки при сжатии гелия на 5-10°C меньше. В исследованных режимах температура нагрева не влияет на прочность мембранной головки и не нуждается в дополнительном охлаждении.

8. Исследована прочность штока мультипликатора. Максимальное давление разрушения штока мультипликатора равно ~3,2 ГПа. Рабочее давление мультипликатора рекомендуется 1,5-2,0 ГПа. Для увеличения рабочего давления шток мультипликатора рекомендуется упрочнять, выполнять из твердого сплава или в поддержке. Для увеличения несущей способности корпуса мембранной головки и корпуса мультипликатора предложен автофретаж под избыточным давлением на 15-25%.

9. Предложена методика двухступенчатого сжатия газов до их затвердевания. Определено предварительное давление первой и второй ступеней.

10. Предложены и обоснованы методы сжатия газов выше 1,5-2,0 ГПа: в мультипликаторе с подогревом до 3-4 ГПа и, в перспективе, путем ввода газа давлением 1,0-1,5 ГПа от созданных компрессоров в капсулы, помещенные в многоугансонные твердофазовые аппараты с последующим подогревом и дожатием газа до давлений 5 ГПа (50 кбар) и выше.

11. На основании полученных экспериментальных данных с использованием авторских свидетельств № 395618, 582479, 712581 и свидетельства на промышленный образец № 5730, автором созданы и внедрены в народное хозяйство конструктивно простые, надежные и удобные в эксплуатации мембранный компрессор для сжатия газов до 200 МПа (2 кбар) и источник давления для сжатия газов до 1,5-

-2,0 ГПа (15-20 кбар). Экономический эффект от внедрения одного мембранного компрессора составляет 57 тыс.рублей, от одного источника давления - 122 тыс.рублей. Всего внедрено свыше 40 мембранных компрессоров и три источника высокого газового давления.

Основные публикации по теме диссертации следующие:

1. Бондаренко М.Д. Мембранный разделитель для сжатия газов до 200 МПа (2 кбар)// Приборы и техника эксперимента. - 1973. - № 4. - С.223-225.

2. Бондаренко М.Д. Установка для сжатия газов до 2 ГПа (20 кбар)// Приборы и техника эксперимента. - 1973. - № 6.-С.158-159.

3. А.с. 395618 (СССР) М.Кл.Ф 04в 45/04. Мембранный компрессор/ М.Д.Бондаренко (СССР). - № 1667681/24-6. Оpubл.28.08.73. Бюл. № 35// Открытия. Изобретения. - 1973. - № 35. - С.116.

4. Бондаренко М.Д. Ступенчатое сжатие газов// Вопросы геохимии, минералогии, петрологии и рудообразования. - Киев: Наук. думка, 1974. - С.209-212.

5. Бондаренко М.Д. Сжатие газов / Тез.докл.У Международной конференции по физике и технике высоких давлений. - М.: Наука, 1975. - С.59.

6. Бондаренко М.Д. Газовые источники давления для экспериментальных исследований материалов при высоких давлениях и температурах // Эксперимент в минералогии и петрографии. - М.: Наука, 1975. - С.87-91.

7. Бондаренко М.Д. Универсальная установка для исследования материалов в широком диапазоне газовых давлений при высокой температуре // Заводская лаборатория. - 1975. - № 7. - С.817-819.

8. Свидетельство на промышленный образец 5730 (СССР). Мембранный компрессор /М.Д.Бондаренко, А.М.Бандур, Л.В.Ремизовский (СССР). - № 10108. Оpubл.05.11.76. Бюл. № 41 // Открытия. Изобретения. - 1976. - № 41. - С.191.

9. Бондаренко М.Д. Аппаратура для исследования материалов в широком диапазоне газовых давлений до 3 ГПа (30 кбар) при температуре до 2000°C // Физические исследования при высоких давлениях. Ч.1. Аппаратура и методика эксперимента. - Таллин. - 1977. С.22-33 (Препринт/Ин-т физики АН ЭССР: МВ-04201).

10. Бондаренко М.Д. Лабораторная аппаратура для синтеза сегнетоматериалов и ферритов методом высокотемпературного газосста-

тического уплотнения // Влияние высокого давления на вещество, Материалы II Республиканского научного семинара. - Киев. - 1977. - С.153-160 (Препринт/ОНТИ ИПМ АН УССР: БФ 07547).

II. А.с. 582479 (СССР) М.Кл.² G 01N 7/00. Установка для газового анализа / М.Д.Бондаренко (СССР). - № 2300491/25-26. Опубл. 30.II.77. Бюл. № 44 // Открытия. Изобретения. - 1977. - № 44. - С.133.

12. Бондаренко М.Д. Особенности конструирования и оптимизации лабораторных источников газового давления до 1,5 ГПа (15 кбар) и выше // Оптимизация конструкции и моделирование процессов поршневых и центробежных компрессоров высокого давления. Тез.докл.Всесоюзного научно-технического семинара. - Сумы. - 1978. - С.24-25.

13. Бондаренко М.Д. Некоторые особенности конструирования высокотемпературной газовой аппаратуры высокого давления // Эксперимент и техника высоких газовых и твердофазовых давлений. - М.: Наука, 1978. - С.49-64.

14. Бондаренко М.Д. Сжатие газов до 1,5-2,0 ГПа (15-20 кбар) и выше // Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении. Раздел "Энергомашиностроение". Тез.докл.Всесоюзной научно-технической конференции. - М. - 1980 (Препринт/МВТУ им. Н.Э.Баумана).

15. А.с. 712581 (СССР). М.Кл.² F16J 13/12. Сосуд высокого давления / М.Д.Бондаренко (СССР). - № 2318569/25-08. Опубл. 30.01.80. Бюл. № 4 // Открытия. Изобретения. - 1980. - № 4. - С.116.

16. Бондаренко М.Д. Аппаратура для горячего изостатического прессования // Физика и техника высоких давлений. - Киев: Наук. думка, 1981. - Вып.5. - С.82-85.

17. Бондаренко М.Д. Исследование аппаратуры газового давления до 15-20 кбар // Современная техника и методы экспериментальной минералогии. - М.: Наука, 1985. - С.129-134.

18. Бондаренко М.Д., Лубенец В.Д., Пластинин П.И. О целесообразности применения газов в качестве среды, передающей давление // Физика и техника высоких давлений. - Киев: Наук.думка, 1986. - Вып.23. - С.81-82.

Стор
A-60560 от 27.04.87 ЗАКАЗ №527
Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Ротапринт МВТУ им.Н.Э.Баумана

