

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики твердого тела

КРИОГЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ для обучающихся по направлению
14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и физика низ-
ких температур» очной формы обучения

Воронеж 2021

УДК ...
ББК ...

Составители:
К. Г. Королев

Криогенное оборудование: методические указания по выполнению лабораторных работ для обучающихся по направлению 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и физика низких температур» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: К.Г. Королев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 50 с.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле [МУ-140301-ЛР-КО.pdf](#).

Табл. 4. Ил. 13. Библиогр.: 5 назв.

УДК ...
ББК ...

Рецензент – В.В. Ожерельев, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры технологии сварочного производства и диагностики ВГТУ

Рекомендовано методическим семинаром кафедры ФТТ и методической комиссией ФРТЭ Воронежского государственного технического университета в качестве методических материалов

Введение

Лабораторный практикум по курсу «Криогенная техника» предназначен для студентов, обучающихся по направлению 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиля «Техника и физика низких температур» очной формы обучения.

Цель лабораторного практикума – дать техническое описание и рекомендации по выполнению лабораторных работ, рассмотреть устройство и принцип действия различных видов криогенных машин и установок, что поможет студентам в углубленном изучении теоретических и практических основ эксплуатации криогенного оборудования, получении навыков проектирования с использованием ЭВМ.

Курс «Криогенная техника» относится к специальным дисциплинам и является одним из завершающих при подготовке бакалавров.

Во время лабораторных работ студенты в производственном помещении азотного отделения криогенной лаборатории ВГТУ изучают устройство и принцип действия отдельных узлов и агрегатов, их назначение и основные правила безопасной и эффективной эксплуатации криогенной газовой машины ЗИФ-1000, стационарной газификационной установки типа СГУ-7КМ, гелиевой оживительной установки Г-8.

Лабораторная работа №1. Криогенная газовая машина ЗИФ-1000

1.1 Цель работы

Изучение принципа действия, конструкции, правил эксплуатации криогенной газовой машины ЗИФ-1000 и ее составных частей.

1.2 Теоретические сведения

Во время лабораторной работы студенты в производственном помещении азотного отделения криогенной лаборатории ВГТУ изучают устройство и принцип действия отдельных узлов установки ЗИФ-1000, их назначение и основные правила безопасной и эффективной эксплуатации, осуществляют некоторые операции по эксплуатации установки под надзором преподавателя и представителя производства.

1.2.1 Назначение установки

Криогенная газовая машина (КГМ) предназначена для сжижения газов, температура конденсации которых не ниже 73 К (рис. 1.1).

Таблица 1.1

Технические характеристики установки

Параметр	Значение
Тип машины	Поршневая с вытеснителем
Холодопроизводительность на температурном уровне минус 195,8 °С,	1000 ккал/час
Используемый криоагент	Гелий
Рабочее давление гелия	25 атм.
Система охлаждения	Водяная под давлением
Охлаждающая жидкость	Вода питьевая
Расход охлаждающей воды	1000 л/час
Мощность электродвигателя	17 кВт
Соппротивление водяного тракта при расходе 1000 л/час	0,3 мПа (3 атм.)
Система смазки	Принудительная под давлением и разбрызгиванием
Рабочее масло	Тп-22 или Тп-22С
Привод	Двигатель трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором N = 18,5 кВт, n = 1460 об/мин, U = 380 В, F = 50 Гц
Масса машины	465 кг

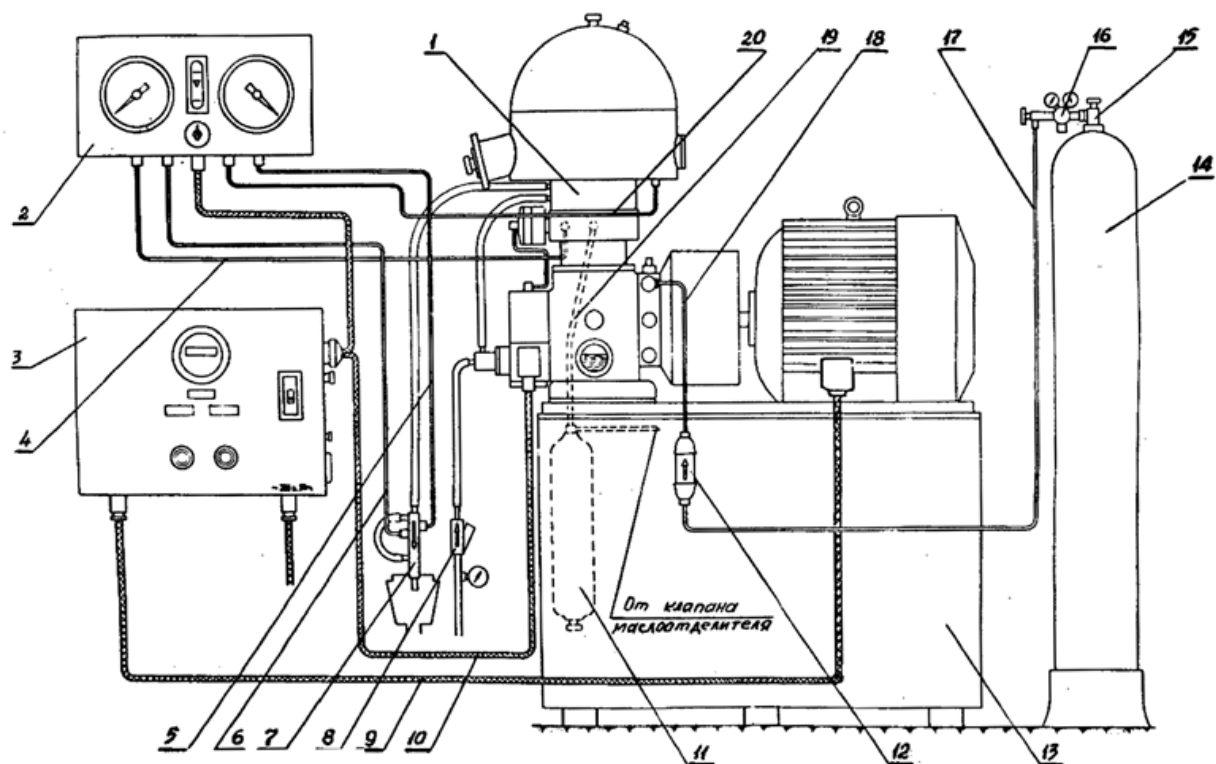


Рис. 1.1. Криогенная газовая холодильная машина ЗИФ-1000:

- 1 – гелиевый холодильник; 2 – приборный щит; 3 – щит управления; 4 – трубка манометра; 5 – трубка к электроконтактному вакуумметру для контроля разряжения в водоструйном насосе; 6 – трубка к электроконтактному манометру для измерения давления гелия; 7 – водоструйный насос; 8 – водяной фильтр; 9 – электрокабель; 10 – трубка к расходомеру воды; 11 – пусковой баллон; 12 – осушитель газа; 13 – каркас машины; 14 – баллон с гелием; 15 – вентиль; 16 – редуктор; 17, 18, 19 – трубопровод

В установке для получения жидкого азота криогенная газовая машина служит источником холода, необходимого для функционирования установки, однако она может быть использована самостоятельно для конденсации газов или криостатирования сконденсированных газов.

Ожижаемый газ не подвергается в КГМ сжатию и не вступает в контакт с движущимися частями машины и смазкой, поэтому жидкий продукт получается чистым.

Наличие защиты электродвигателя от перегрузки и токов короткого замыкания, блокировки по расходу охлаждающей воды, давлению масла в системе и рабочему давлению гелия в машине делают ее надежной и простой в эксплуатации, не требующей постоянного наблюдения и специального обслуживания во время работы. Общий вид криогенной газовой машины ЗИФ-1000 представлен на рис. 1.2.

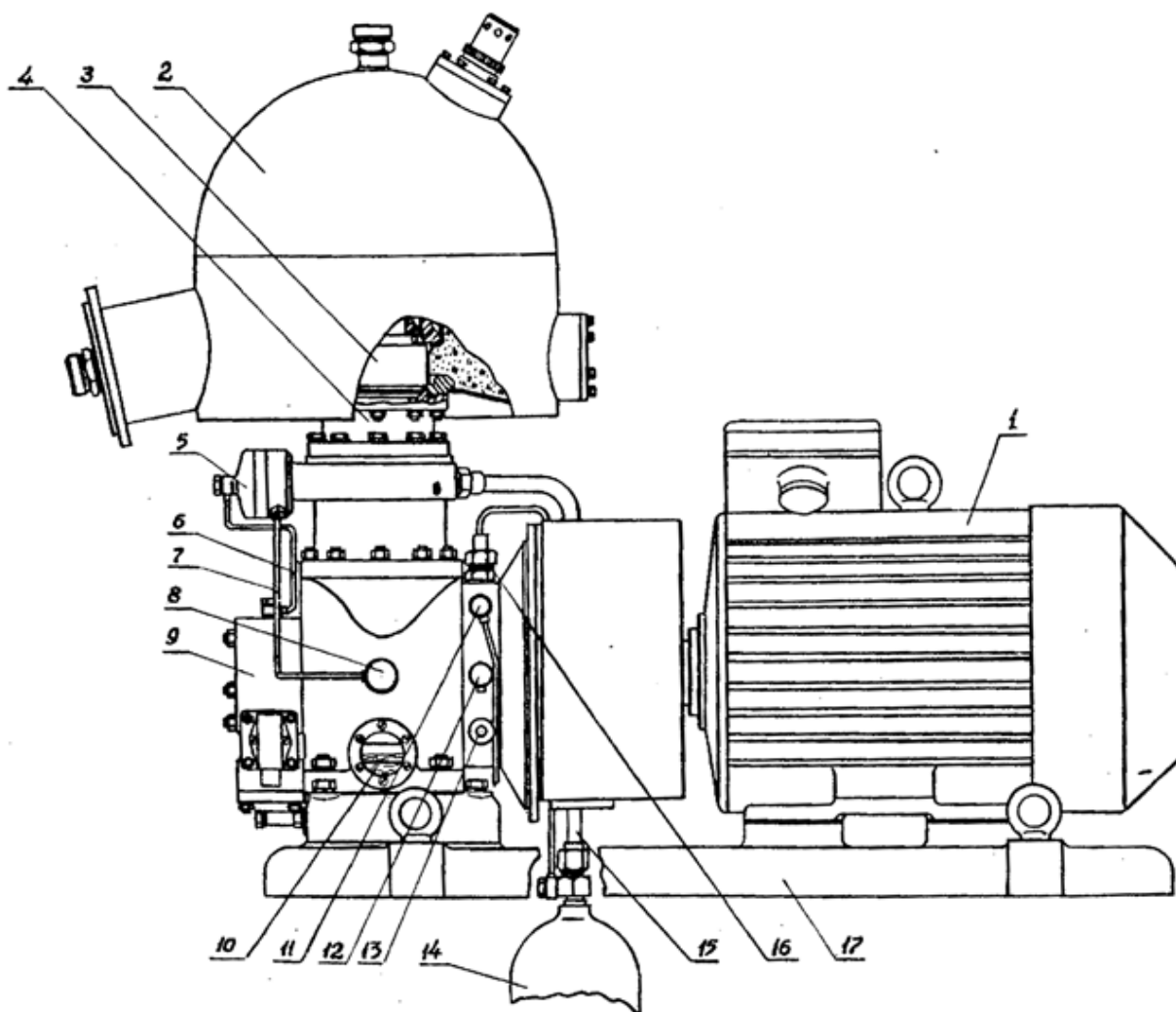


Рис. 1.2. Общий вид криогенной газовой машины ЗИФ-1000:
 1 – электромотор; 2 – ожижитель; 3 – регенератор; 4 – гелиевый холодильник;
 5 – пусковой обратный клапан; 6, 7 – трубка; 8 – штуцер картера для заливки
 масла; 9 – корпус; 10 – смотровое стекло; 11 – клапан наполнения; 12 – про-
 дувочный клапан; 13 – обратный клапан; 14 – пусковой баллон; 15 – арматура
 пускового баллона; 16 – переливной клапан; 17 – основание

Холодопроизводительность машины установлена при следующих номи-
 нальных условиях:

- рабочее давление гелия 2,5 МПа
- расход охлаждающей воды 1000 л/час
- температура охлаждающей воды 15 °С
- температура окружающего воздуха 20 °С
- атмосферное давление 101,3 кПа (760 мм рт. ст.)

1.2.2 Устройство и принцип действия

Основными агрегатами КГМ обеспечивающими получение низкой температуры являются:

- компрессор,
- гелиевый холодильник,
- регенератор,
- вытеснитель,
- ожижитель,

которые выполнены в виде одного герметичного агрегата, заполненного криоагентом – гелием и смонтированного вместе с электродвигателем на общей плите.

Гелий обладает более низкой температурой конденсации, чем газы, для которых предназначена КГМ. Кроме того, гелий является инертным газом, что обеспечивает безопасность эксплуатации КГМ.

Процесс ожижения газов осуществляется в ожижителе в результате непосредственного соприкосновения ожижаемого газа с холодной поверхностью стенок корпуса теплообменника. Холод, необходимый для ожижения газов, получается в верхней полости компрессора, примыкающего к теплообменнику ожижителя, за счет периодического расширения гелия в этой полости.

В результате сжатия гелия в компрессоре и последовательного его охлаждения в холодильнике и регенераторе, газ затем расширяется с получением холода. Такое цикл сжатия и расширения позволяет после многократных повторений достичь гелием температуры минус 200 °С. При взаимодействии охлажденного гелия и ожижаемого газа через стенки корпуса теплообменника газ конденсируется и стекает по трубопроводу ожижителя.

Таким образом, в криогенной газовой машине одновременно происходят два процесса получения холода – внутренний процесс и процесс конденсации газов – внешний процесс.

Работа криогенной газовой машины контролируется приборами управления и автоматически останавливается, если параметры:

- расход воды в системе охлаждения;
- давление масла в системе смазки;
- рабочее давление гелия в машине,

выходят за допустимые пределы.

1.2.3 Процесс получения холода (внутренний процесс)

Пространство над поршнем является рабочим пространством криогенной газовой машины, которое разделено вытеснителем на две части – зону сжатия и зону расширения. Зона расширения расположена над вытеснителем, а зона сжатия – под ним.

При работе КГМ вращательное движение коленчатого вала через вильчатый шатун поршня и шатун вытеснителя преобразуется в возвратно-поступательное движение поршня и вытеснителя. Шатунные шейки коленчатого вала, связанные с вильчатым шатуном, смещены относительно шатунной шейки вытеснителя так, что при своем движении вытеснитель опережает поршень по фазе. Вследствие фазового сдвига и разности ходов поршня и вытеснителя при их возвратно-поступательном движении происходит периодическое сжатие и расширение гелия в соответствующих зонах КГМ.

В момент сближения поршня и вытеснителя гелий сжимается в зоне сжатия и затем проталкивается через холодильник и регенератор в пространство над вытеснителем. Тепло, выделяющееся при сжатии гелия, отводится в холодильнике охлаждающей водой, а в регенераторе передается насадке. В период совместного движения поршня и вытеснителя вниз происходит расширение гелия в пространстве над вытеснителем, при этом температура гелия понижается, что приводит к охлаждению теплообменника ожижителя.

При движении вытеснителя вверх холодный гелий проталкивается через регенератор и холодильник в пространство между поршнем и вытеснителем, при этом насадка регенератора отдает тепло, накопленное ранее, гелию, который нагревается.

Описанные процессы происходят за полный оборот коленчатого вала. При последующих оборотах эти процессы повторяются и происходит дальнейшее охлаждение теплообменника ожижителя. Для наглядного представления вышеописанного процесса движений поршня и вытеснителя один оборот коленчатого вала условно разделен на четыре фазы.

1.2.3.1 Фаза сжатия

Вытеснитель совершает малое перемещение около крайнего верхнего положения, а поршень перемещается вверх, сжимая гелий во всем рабочем пространстве. В этой фазе основная масса гелия находится между поршнями.

1.2.3.2 Фаза переталкивания

Поршень совершает малое перемещение около крайнего верхнего положения, а вытеснитель перемещается вниз и переталкивает гелий без изменения его объема через холодильник и регенератор в зону расширения. В холодильнике тепло сжатия отводится охлаждающей водой; в регенераторе большая часть оставшегося тепла поглощается его насадкой, а гелий охлаждается за счет холода накопленного в регенераторе за предыдущие циклы.

1.2.3.3 Фаза расширения

Поршень и вытеснитель одновременно перемещаются вниз, пространство над вытеснителем (зона расширения) при этом увеличивается, гелий расширяется и охлаждается до минус 200 °С.

1.2.3.4 Фаза переталкивания

Поршень совершает малые перемещения около крайнего нижнего положения, а вытеснитель перемещается вверх, перегоняя холодный гелий из зоны расширения в зону сжатия. При этом часть холода поглощается теплообменником оживителя, а остальная часть насадкой регенератора, так, что из регенератора гелий выходит с плюсовой температурой.

Процесс накопления холода длится от 3 до 5 минут после включения машины. При работе машины насадка регенератора играет роль аккумулятора тепла и холода. От правильной работы регенератора, т.е. полного поглощения тепла и холода во II и IV фазах, в очень большой степени зависит эффективность работы всей машины.

Такой криогенный цикл осуществляется только при вращении коленчатого вала в направлении стрелки, нанесенной на кожухе маховика машины. При вращении в противоположном направлении происходит изменение направления переноса тепла в машине, что ведет к сильному перегреву теплообменника оживителя и верхней части регенератора и к выходу КГМ из строя.

1.2.4 Устройство и принцип действия составных частей

1.2.4.1 Кривошипная группа

Коленчатый вал 3 (см. рис. 1.3) установлен в корпусе 2 на двух коренных подшипниках скольжения 8. Коленчатый вал – двухкривошипный. Он имеет две крайние шатунные шейки для присоединения вильчатого шатуна поршня и среднюю для присоединения шатуна вытеснителя. Противовесы установлены на крайних щеках коленчатого вала.

Коленчатый вал имеет продольный канал для подачи масла к коренным и шатунным шейкам.

При работе машины выходной конец вала находится при атмосферном давлении, противоположный же его конец находится внутри герметичного корпуса и испытывает давления гелия и масла. Вследствие разности давлений вал стремится сместиться в сторону маховика. Для предотвращения этого смещения установлен упорный подшипник скольжения, состоящий из неподвижного кольца 12 с вставными сегментами 11. В сегменты упирается кольцо 9 насаженное, на коленчатый вал и зафиксированное на нем штифтом. Кольцо 9 закреплено на валу вместе с шестерней 10, которая находится в зацеплении с приводной шестерней масляного насоса.

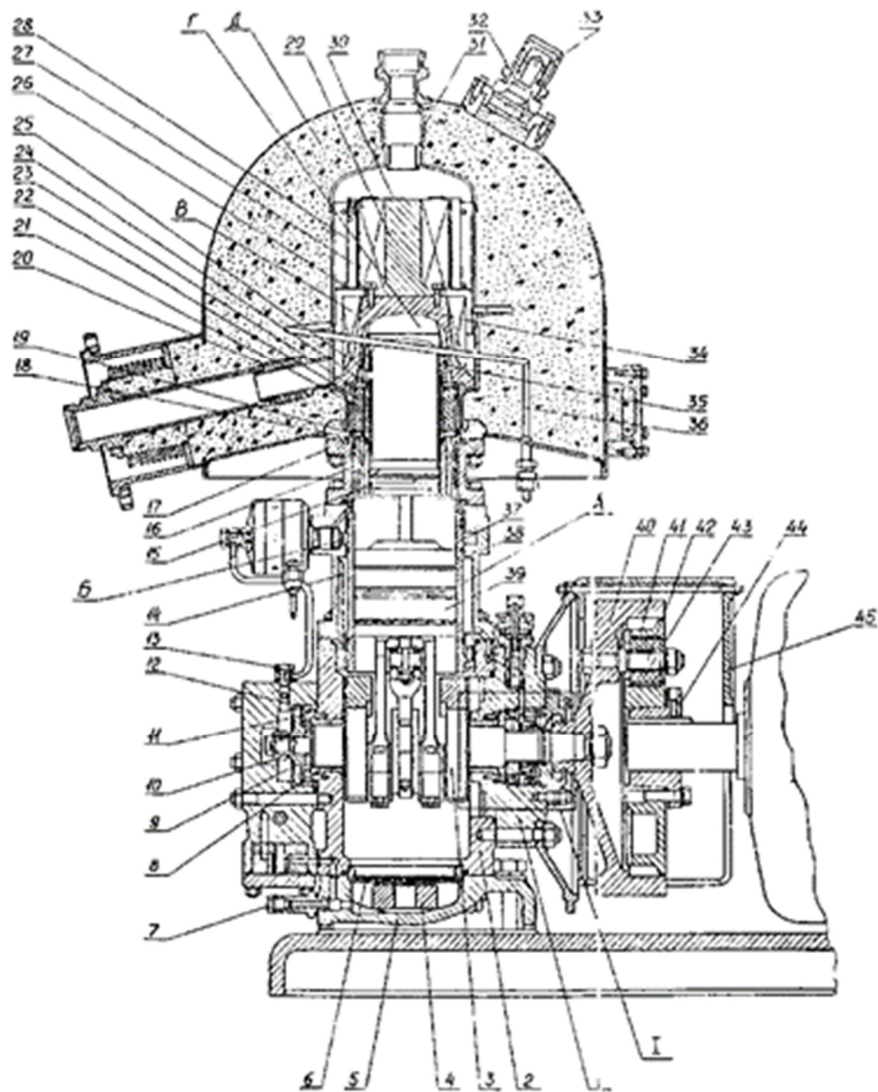


Рис. 1.3. Устройство ЗИФ-1000:

1 - камера распределения масла; 2 - корпус; 3 - коленчатый вал; 4 - постоянный магнит; 5 - поддон; 6 - сетчатый фильтр; 7 - пробка слива масла; 8 - коренные подшипники скольжения; 9 - кольцо насаженное на коленчатый вал; 10 - шестерня зацепленная с приводной шестерней масляного насоса; 11 - вставные сегменты; 12 - неподвижное кольцо; 13 - пробка; 14 - переливные трубы для масла; 15 - цилиндр; 16 - медная теплообменная втулка; 17 - корпус гелиевого холодильника; 18 - внутреннее уплотнительное кольцо регенератора; 19 - уплотнительное кольцо; 20 - сифон выходного трубопровода; 21 - наружная втулка регенератора; 22 - насадка регенератора; 24 - внутренняя втулка регенератора; 26 - кольцевые пружины; 27, 28, 30 - сетки; 29 - оребренное основание вымораживателя; 31 - сифон входного трубопровода; 32, 33 - штуцер и резиновая трубка предохранительно клапана; 34 - корпус теплообменника; 35 - втулка; 36 - трубка для отсоса неконденсирующихся газов; 37 - гильза цилиндра; 38 - корпус цилиндра; 39 - поршень; 40, 41 - полумуфты; 42 - пальцы; 43 - амортизаторы; 44 - цанга; 45 - кожух

На выходном конце коленчатого вала установлена полумуфта 40, которая при помощи пальцев 42 через амортизаторы 43 соединяется с полумуфтой 41. Полумуфта 41 с помощью цанги 44 закреплена на валу электродвигателя. Полумуфты 40 и 41 передают вращение от электродвигателя коленчатому валу машины и своей массой обеспечивают необходимую равномерность вращения. Амортизаторы 43 компенсируют неизбежные незначительные смещения валов машины и электродвигателя. Полумуфты закрыты кожухом 45, на котором нанесена стрелка, указывающая направление вращения вала машины.

Корпус машины закрыт снизу поддоном 5. Для очистки масла, поступающего в масляный насос, в поддоне установлен сетчатый фильтр 6 и постоянный магнит 4. В нижней части поддона имеется канал для слива масла из машины. В корпусе 2 имеется отверстие, закрытое смотровым стеклом 10 (см рис. 1.2), на котором нанесены две горизонтальные риски для контроля уровня масла в машине.

1.2.4.2 Шатунно-поршневая группа

На две крайние шатунные шейки коленчатого вала установлен вильчатый шатун 8 поршня 1 (см. рис. 1.4). В нижние головки шатуна вставлены тонкостенные вкладыши 33, залитые баббитом, а в верхнюю головку шатуна вставлена втулка 9. Во втулке 9 установлен поршневой палец 10, к концам которого крепится опора поршня 2. В опоре поршня установлена втулка 30 для направления штока вытеснителя. Сверху на опору 2 установлен поршень 1 и закреплен на ней вместе с втулкой 30 гайкой 13, ввинченной в опору. Поршень 1 удерживается от проворачивания на опоре штифтом. Между гайкой 13 и поршнем 1 установлено уплотнительное кольцо 29, а между гайкой и втулкой 30 – уплотнительное кольцо 28.

На средней шатунной шейке коленчатого вала установлен шатун вытеснителя 6. В нижней головке этого шатуна установлены тонкостенные баббитовые вкладыши 7, а в верхней головке – втулки 32. Верхняя головка шатуна соединена со штоком 27 при помощи пальца 31. На пальце 31 установлен крейцкопф 5, который при работе машины перемещается по стенкам гильзы цилиндра. Шток 27 проходит через втулку 30 и соединен с поршнем вытеснителя 14 при помощи двух полувтулок 23, кольца 24 и пробки 20. На поршне вытеснителя установлены кольцо 15 и втулка 18, в которой, в свою очередь, установлены два пружинных кольца 16 с надетым на них уплотнительным кольцом 26 и разрезное кольцо 17, которое обеспечивает направление вытеснителя в цилиндре холодильника. На поршень вытеснителя накручен колпак 21, внутренняя полость которого заполнена набивкой для уменьшения конвективного теплообмена между головкой колпака 21 и поршнем вытеснителя 14.

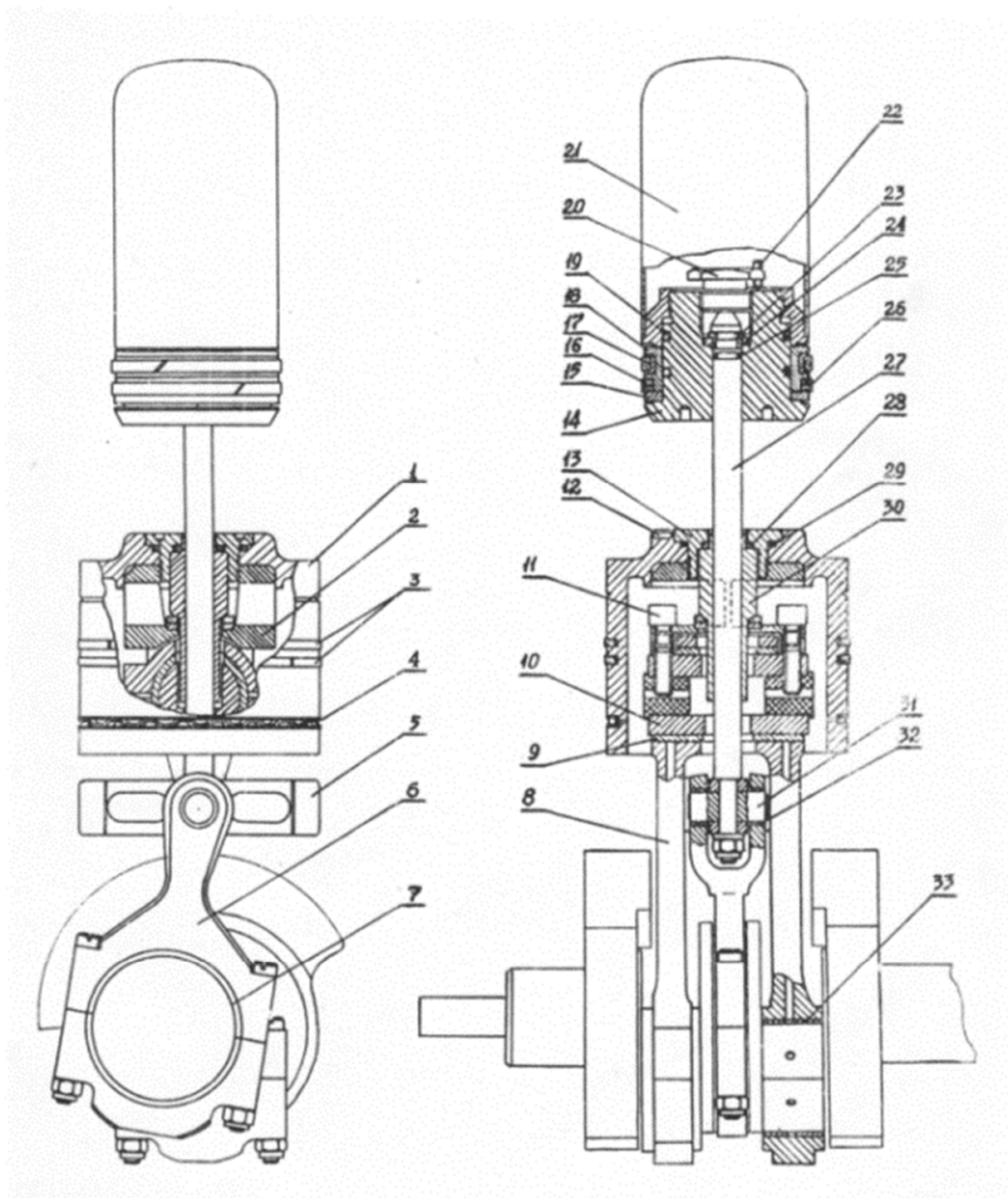


Рис. 1.4. Схема шатунно-поршневой группы

Поршень 1 установлен в гильзе цилиндра 37 (см. рис. 1.3), которая, в свою очередь, установлена в корпусе цилиндра 38. Полость А между стенками гильзы цилиндра 37 и корпусом 38 служит для заполнения её маслом, охлаждающим гильзу цилиндра. Масло поступает в полость А из переливного клапана по каналам в камере распределения 1, в корпусе 2 и в корпусе 38. Из полости А масло сливается обратно в корпус 2 через переливные трубки 14.

Полость Б представляет собой буферное пространство, заполненное гелием. В корпусе цилиндра 38 в районе буферной полости установлены: пусковой обратный клапан, клапан внутренней подпитки, штуцер для подсоединения пускового баллона и винт для продувки буферной полости.

1.2.4.3 Группа клапанов

Клапан наполнения 11 (см. рис. 1.2) предназначен для заполнения машины гелием через обратный клапан 13. Обратный клапан 13 (см. рис. 1.2) служит для заполнения машины гелием и сброса давления из машины. Он же используется для дозаправки машины маслом, когда она находится под давлением. Продувочный клапан 12 (см. рис. 1.2) предназначен для выпуска гелия из машины через обратный клапан 13. Переливной клапан 16 (см. рис. 1.2) предназначен для регулировки давления масла в системе смазки машины. Через него осуществляется подача масла в полость охлаждения цилиндра.

1.2.4.4 Гелиевый холодильник

Гелиевый холодильник 4 (рис. 1.2) предназначен для отвода тепла от гелия, проходящего из зоны сжатия в зону расширения. Гелиевый холодильник через уплотнительное кольцо установлен и закреплен на корпусе машины.

Гелиевый холодильник состоит из корпуса 17 (см. рис. 1.3), медной теплообменной втулки 16, которая двумя кольцевыми швами приварена к корпусу холодильника, и цилиндра 15. Теплообменная втулка 16 на внутренней поверхности имеет большое количество узких пазов для прохода гелия. На наружной поверхности этой же втулки имеются кольцевые проточки для увеличения поверхности теплообмена со стороны охлаждающей воды. Для входа и выхода охлаждающей воды корпус холодильника снабжен штуцерами. При работе машины гелий циркулирует по пазам втулки 16 из зоны сжатия в зону расширения и обратно и охлаждается водой, омывающей кольцевые наружные пазы втулки 16.

1.2.4.5 Регенератор

Регенератор 3 (см. рис. 1.2) предназначен для периодического быстрого поглощения тепла от гелия, проходящего из зоны сжатия в зону расширения, и передачи этого же холодного тепла гелию при его обратном ходе из зоны расширения в зону сжатия. Регенератор установлен в гнезде ожигителя 2.

Регенератор состоит из наружной 21 (см. рис. 1.3) и внутренней 24 втулок, выполненных из материала с низкой теплопроводностью. В пространстве между втулками 21 и 24 размещена насадка регенератора 22, основу которой составляет очень тонкая медная проволока.

При проходе гелия из зоны сжатия в зону расширения через регенератор теплый гелий отдает насадке свое тепло, а сам охлаждается. Это тепло сохраняется в регенераторе без значительных потерь до прохода гелия в обратном

направлении. При проходе гелия из зоны расширения в зону сжатия происходит обратный процесс – насадка отдает тепло холодному гелию, и он нагревается. При загрязнении насадки регенератора даже небольшим количеством масла или при попадании в нее влаги ухудшается теплообмен между гелием и насадкой, что приводит к снижению холодопроизводительности машины.

1.2.4.6 Ожижитель

Ожижитель 2 (см. рис. 1.2) предназначен для передачи холода, выработанного в зоне расширения машины, конденсируемому газу. Ожижитель вместе с регенератором установлен на холодильнике. Ожижитель представляет собой сварную конструкцию, имеющую три полости:

- полость расширения Г, расположенную внутри корпуса теплообменника 34 (см. рис. 1.3);
- полость конденсации В, расположенную снаружи корпуса теплообменника 34 (см. рис. 1.3);
- полость теплоизоляции Д, расположенную между кожухом и полостью конденсации.

Теплообменник ожижителя выполнен следующим образом: корпус теплообменника 34 большой массы выполнен из меди с большим количеством внутренних и наружных пазов. Внутри корпуса теплообменника установлена втулка 35, являющаяся продолжением цилиндра вытеснителя. На верхней части корпуса теплообменника установлен вымораживатель, который состоит из орехового основания 29 с припаянными к нему сетками 28 и 30. На сетку 28 надета гофрированная сетка 27 и поджата кольцевыми пружинами 26. Вымораживатель имеет с теплообменником надежный тепловой контакт. Вход и выход из полости конденсации осуществляется трубопроводами через сильфоны 20 и 31. Отсос неконденсирующихся газов из полости конденсации производится по трубке 36.

Теплоизоляционная полость ожижителя для уменьшения теплообмена между внешней средой и холодными поверхностями ожижителя заполнена высокоэффективным теплоизолирующим материалом.

Во время работы машины в теплоизоляционной полости создается некоторое разрежение. Полость теплоизоляции снабжена предохранительным устройством на случай подсоса в нее окружающего воздуха при нарушении герметичности и повышения в ней давления после остановки машины. Предохранительное устройство состоит из штуцера 32 с надетой на него резиновой трубкой 33. Для предохранения трубки 33 от случайных повреждений она прикрыта колпаком, навинченным на штуцер 32. Предохранительное устройство срабатывает при избыточном давлении в теплоизоляционной полости 0,03 – 0,07 МПа (0,3 - 0,7 атм.). После сброса избыточного давления резиновая втулка 33 вновь прижимается к штуцеру 32 и отделяет полость теплоизоляции от внешней среды.

1.2.4.7 Привод машины

В качестве привода криогенной газовой машины использован трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Пуск электродвигателя осуществляется непосредственным включением его на полное напряжение.

1.2.4.8 Пусковой баллон

Для облегчения работы электродвигателя и машины в пусковой период к буферной полости цилиндра трубопроводом 15 (см. рис. 1.2) присоединен пусковой баллон 14, который увеличивает объем полости сжатия на период пуска машины и тем самым облегчает условия работы электродвигателя и машины в пусковой период. Этот же баллон используется для отделения масла от гелия и сброса давления гелия, которое производится через нижнее отверстие баллона, закрытое пробкой.

1.2.4.9 Водяной фильтр

Водяной фильтр 8 (см. рис. 1.1) предназначен для очистки охлаждающей воды от механических примесей. Водяной фильтр (см. рис. 1.5) состоит из корпуса, в который вставлен стакан с сеткой, поджатый пробкой. Направление потока воды указано стрелкой на корпусе фильтра.

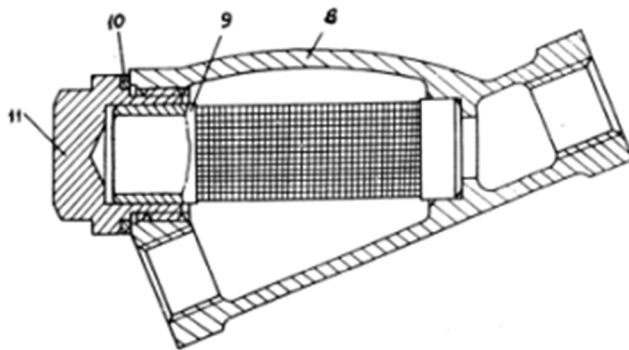


Рис. 1.5. Схема водяного фильтра

1.2.4.10 Водоструйный насос

Водоструйный насос 7 (см. рис. 1.1) совместно с электроконтактным вакуумметром предназначен для блокировки машины по расходу охлаждающей воды. Он одновременно обеспечивает отсос неконденсирующихся газов из оживителя машины. Водоструйный насос (рис. 1.6) представляет собой сопло с установленными на нем штуцерами.

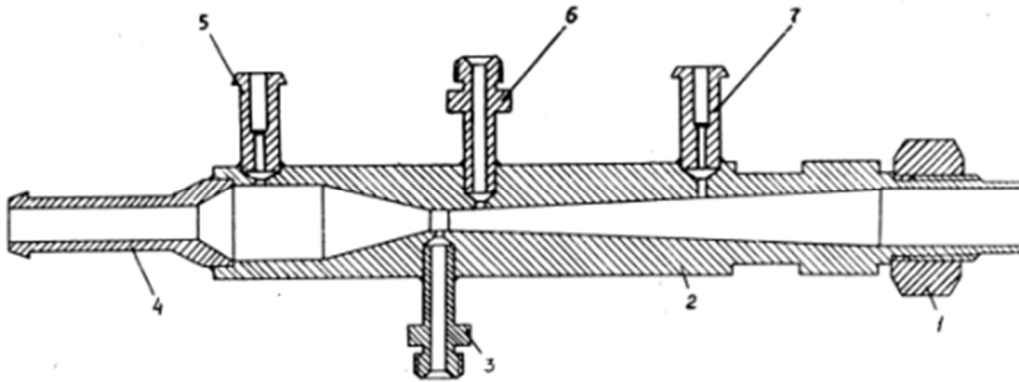


Рис. 1.6. Схема водоструйного насоса

Назначение штуцеров:

- штуцер 4 предназначен для присоединения отводящего шланга системы охлаждения машины;
- штуцер 3 предназначен для подсоединения электроконтактного вакуумметра;
- штуцер 6 предназначен для отсоса неконденсирующихся газов из охладителя машины;
- штуцера 5 и 7 предназначены для подачи воды в азотную колонну и ее слива.

При прохождении через сопло 2 охлаждающей воды в наименьшем сечении сопла устанавливается разрежение, величина которого зависит от расхода протекающей воды. Величина разрежения фиксируется электроконтактным вакуумметром. При установлении в системе - охлаждения машины минимально допустимого расхода охлаждающей воды вакуумметр, фиксируя соответствующее значение разрежения, размыкает контакты и выдает команду, разрешающую пуск машины.

1.2.4.11 Осушитель газа

Осушитель газа 12 (см. рис. 1.1) представляет собой небольшой баллончик со штуцерами 1 и 6 (см. рис. 1.7). Направление потока газа указано на корпусе осушителя стрелкой. На входе в осушитель установлен сетчатый фильтр 3, а на выходе – войлочный фильтр 5. Внутреннее пространство между фильтрами заполнено силикагелем 4, который является хорошим поглотителем влаги.

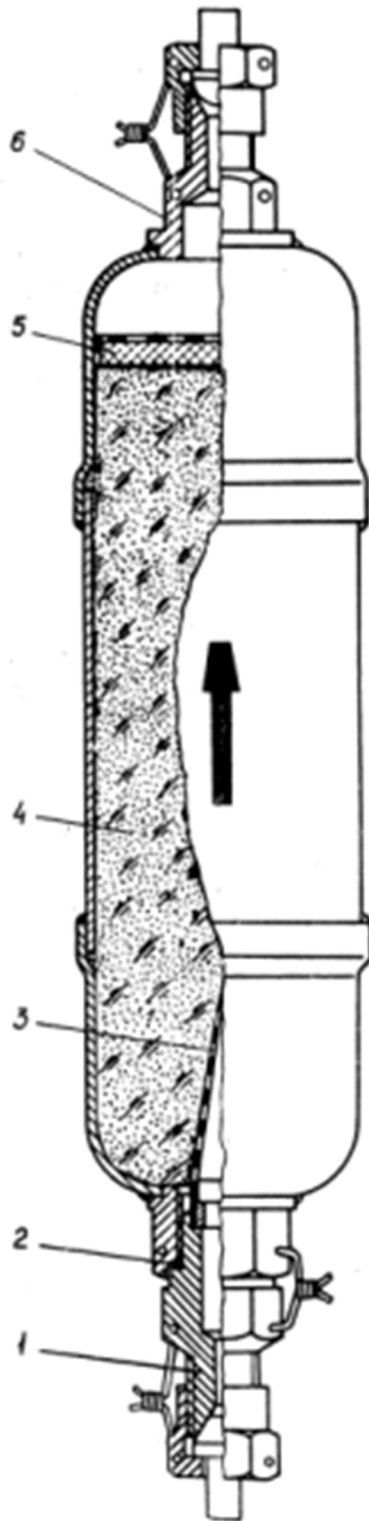


Рис. 1.7. Осушитель газа

вые сигналы 8 «Вода», «Масло», «Гелий». На правой боковой стенке щита управления размещены: предохранитель 15, клемма 17 «Земля», колодка штепсельного разъема 12 для подключения приборного щита и датчика давления масла, розетка 16 для подключения пылесоса. На нижней стенке щита управления размещены сальники 3 и 7 для подвода питания к щиту управления и подключения электродвигателя.

На приборном щите 2 (см. рис. 1.1) смонтированы электроконтактный манометр 13 (рис. 1.9), электроконтактный вакуумметр 20, расходомер 15 и кран расходомера 5.

Электроконтактный манометр 13 предназначен для измерения давления гелия в машине и блокировки ее по давлению гелия. Манометр дает возможность контролировать давление заправки и рабочее давление гелия. Нижний и верхний ограничители выставляются соответственно на нижний и верхний пределы рабочего диапазона давлений. В рабочем диапазоне давлений цепь манометра разомкнута, за его пределами – замкнута.

Электроконтактный вакуумметр 20 дает возможность контролировать разрежение в водоструйном насосе 7 (см. рис. 1.1) при прохождении через него охлаждающей воды и осуществляет блокировку машины по ее расходу. Конструкция, принцип действия и настройка вакуумметра аналогична конструкции, принципу действия и настройке электроконтактного манометра.

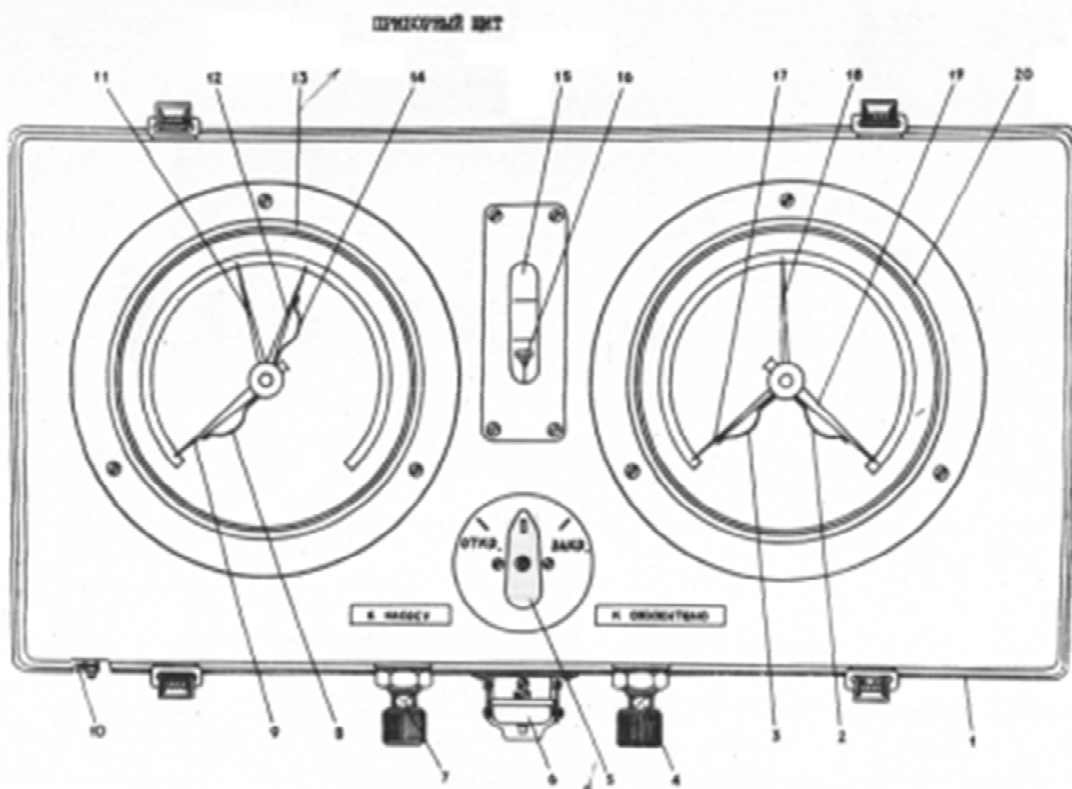


Рис. 1.9. Схема приборного щита

Расходомер 15 неконденсирующихся газов, отсасываемых из ожижителя машины, представляет собой вертикально расположенную стеклянную трубку, внутри которой свободно перемещается поплавков 16. Со стороны лицевой панели щита трубка расходомера прикрыта пластинкой из органического стекла, на поверхности которой нанесены две риски, соответствующие расходу отсасываемого газа. Верхняя риска – 2 л/мин, нижняя риска – 1 л/мин. При нормальной работе машины поплавков 16 устанавливается в среднее положение между рисками поворотом ручки крана расходомера 5.

1.2.5 Системы обеспечения нормальной работы и контроля за работой машины

1.2.5.1 Система питания машины гелием

Рабочим телом (криоагентом) машины является гелий, которым заправляется машина перед пуском ее в работу. Машина выполнена в герметичном исполнении. Во всех ее разъемных соединениях предусмотрены уплотнения, надежно обеспечивающие герметичность. Однако практически могут иметь место небольшие утечки гелия из машины, которые должны периодически восполняться. Для заправки и дозаправки машины гелием предусмотрена система заправки. Система заполнения машины гелием схематически показана на рис. 1.10.

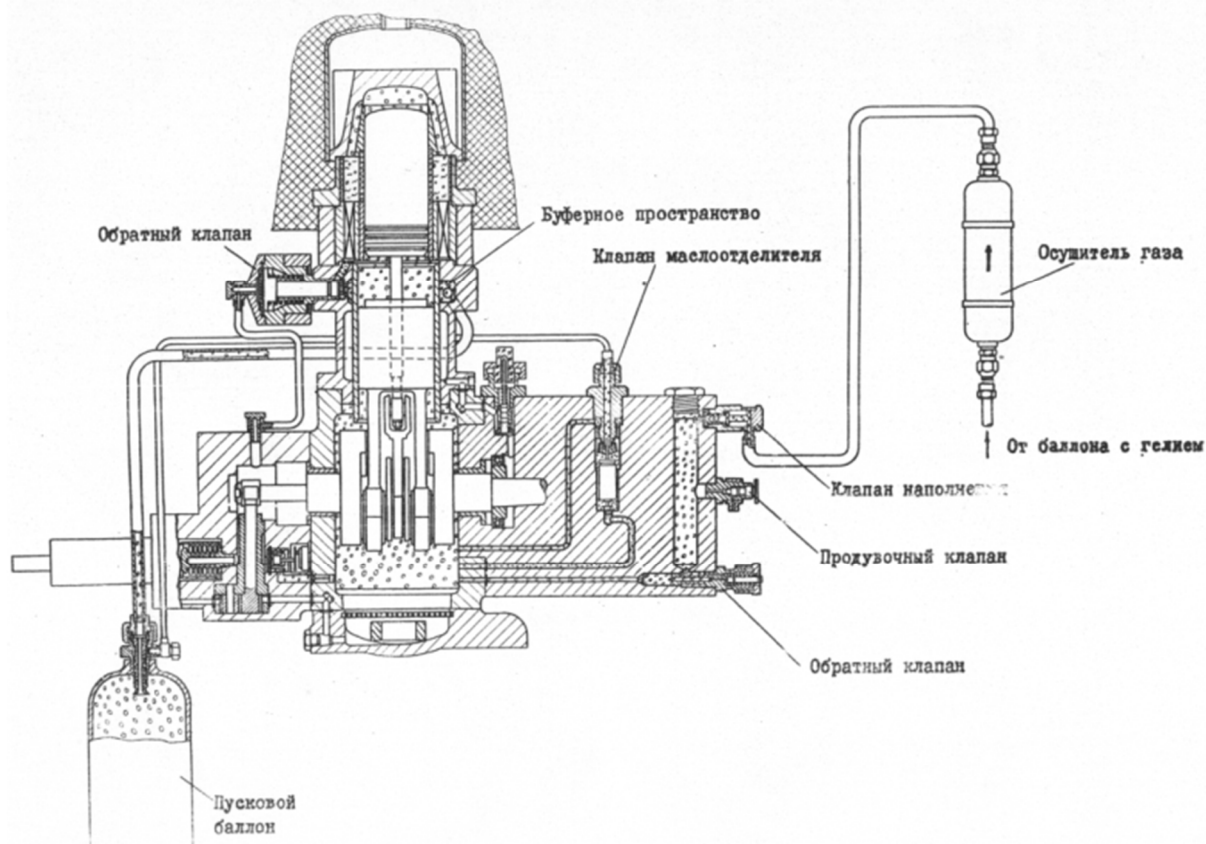


Рис. 1.10. Система наполнения машины гелием

При работе машины имеет место внутренняя утечка гелия из зоны сжатия в картер машины. Внутренние утечки гелия из зоны сжатия автоматически выполняются системой внутренней подпитки, предусмотренной конструкцией машины. Таким образом, машина имеет две системы питания гелием – внешнюю и внутреннюю.

В неработающей машине гелий находится при одинаковом давлении как в рабочем пространстве, так и в картере машины. Вследствие большого сопротивления прохождению гелия к манометру он дает правильные показания с некоторым запозданием, в связи с чем производить дозаправку гелием работающей машины опасно и следует осуществлять ее только на неработающей машине.

1.2.5.2 Система смазки машины

Схематическое изображение системы смазки машины показано на рис. 1.11. Система смазки предназначена для смазывания трущихся поверхностей и охлаждения цилиндра во время работы машины. Под давлением смазываются коренные и упорный подшипники коленчатого вала, вкладыши в нижних головках шатунов, поршневой палец, приводные шестерни масляного насоса. Разбрызгиванием смазываются поршень 1 (см. рис. 1.4), крейцкопф 5, палец 31, шток 27 и втулка 30. К кольцу 26 вытеснителя смазка не подводится. Оно смазывается за счет смазки, содержащейся в деревянном разрезном кольце 17. Этого количества смазки достаточно на весь период его работы.

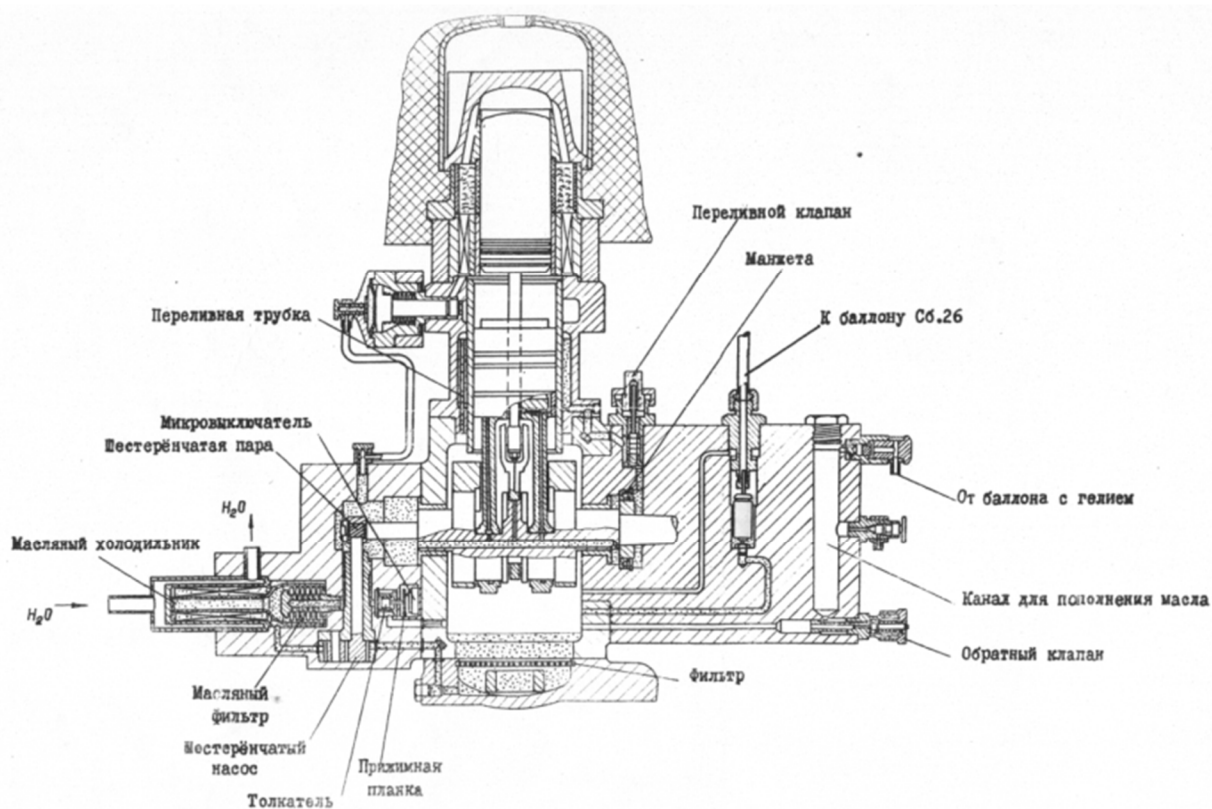


Рис. 1.11. Схема системы смазки машины ЗИФ-1000

Такая система смазки обеспечивает минимальный выброс масла в рабочее пространство машины и обеспечивает длительную ее работу без промывки регенератора.

Конструкция машины предусматривает возможность пополнения ее небольшим количеством масла при неработающей машине, заправленной гелием.

Система смазки обеспечивает длительную работу машины без дозаправки ее маслом. Работа системы смазки контролируется системой блокировок. При падении давления масла в системе ниже допустимого происходит автоматическая остановка КГМ. Во время работы машины на щите управления горит световой сигнал «Масло», свидетельствующий о нормальном давлении масла.

1.2.6 Система охлаждения машины

Система охлаждения водяная под давлением и предназначена для отвода тепла сжатия от гелия и охлаждения масла в системе смазки. Для охлаждения должна применяться питьевая вода. Система охлаждения (рис. 1.12) состоит из сетчатого фильтра, масляного холодильника, гелиевого холодильника, водоструйного насоса и системы шлангов.

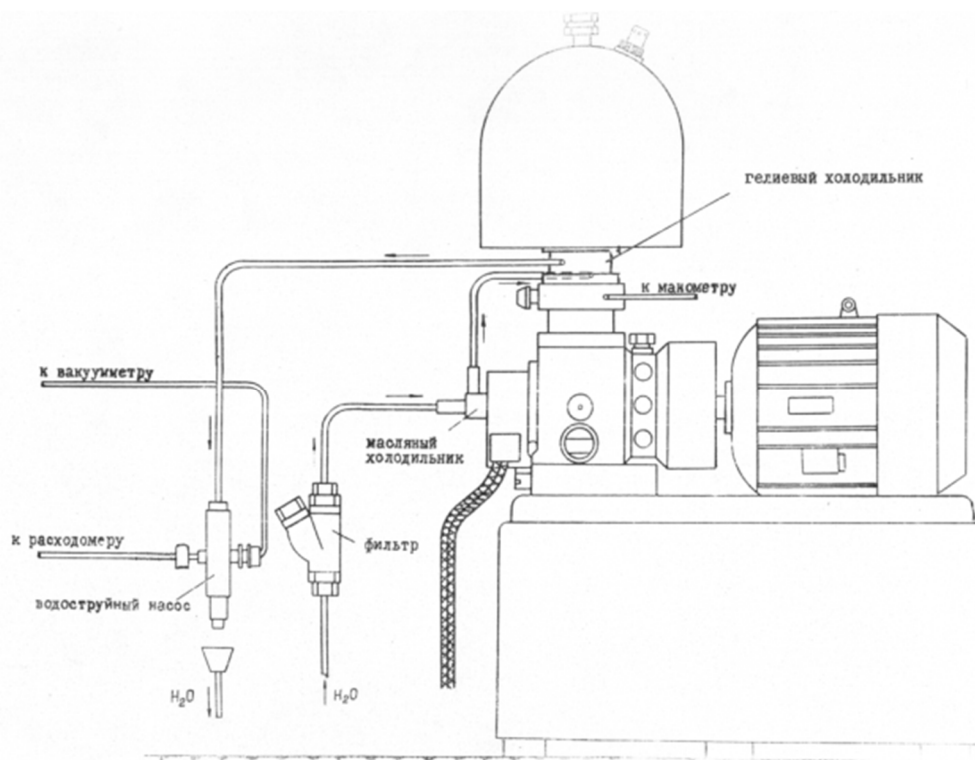


Рис. 1.12. Схема системы охлаждения машины ЗИФ-1000

Работа системы охлаждения надежно контролируется системой блокировок. При расходе осаждающей воды менее 1000 л/ч машина автоматически останавливается. Во время работы машины на щите управления горит световой сигнал «Вода», свидетельствующий о нормальном расходе охлаждающей воды.

Всегда необходимо помнить, что даже кратковременное отсутствие охлаждающей воды при работающей машине приводит к выходу машины из строя.

1.2.7 Пусковая аппаратура и приборы управления

Пусковая аппаратура и приборы управления предназначены для пуска и остановки машины, защиты ее от перегрузок и автоматического контроля за работой машины по основным параметрам:

- расход охлаждающей воды,
- давление масла в системе смазки,
- рабочее давление гелия.

При выходе любого из этих параметров за допустимые пределы, а также при перегрузке электродвигателя происходит автоматическая остановка КГМ. Постоянное горение всех трех световых сигналов на щите управления свидетельствует о нормальной работе машины.

1.3 Выполнение работы

Ознакомится с назначением, параметрами и принципом работы криогенной газовой машины ЗИФ-1000 используя описание в методическом руководстве и стенд.

Изучить процесс получения холода в криогенной газовой машине ЗИФ-1000, фазы работы поршня и вытеснителя.

Изучить устройство гелиевого холодильника, регенератора, ожижителя, кривошипной группы, шатунно-поршневой группы используя описание в методическом руководстве и стенд.

Изучить системы обеспечения нормальной работы машины используя описание в методическом руководстве и стенд

Записать назначение, основные параметры и принцип действия установки криогенной газовой машины ЗИФ-1000.

Нарисовать принципиальную схему холодильного цикла криогенной газовой машины ЗИФ-1000.

1.4 Контрольные вопросы

1. Назовите назначение и основные параметры криогенной газовой машины.

2. Какой холодильный цикл реализован в данной машине. Объясните его суть.

3. Используя рисунок методического руководства расскажите о конструкции машины ЗИФ-1000 в целом и о ее отдельных элементах.

4. Нарисуйте схему цикла данной криогенной машины.

Лабораторная работа №2. Стационарная газификационная установка типа СГУ-7КМ

2.1 Цель работы

Изучение принципа действия, конструкции и правил эксплуатации стационарной газификационной установки СГУ-7КМ и ее составных частей.

2.2 Теоретические сведения

Газификационные установки (газификаторы) – это установки, которые предназначены для перевода криогенных продуктов после транспортировки из жидкого состояния в газообразное с последующим заполнением баллонов либо выдачи непосредственно в технологическую линию.

Существует два способа решения данной задачи:

1) повышение давления криогенной жидкости в насосе с последующей газификацией.

2) испарение криогенной жидкости с последующим сжатием полученного газ в компрессоре.

В первом случае для перевода криогенного продукта из жидкого состояния в газообразное используется процесс газификации (в термодинамике это означает переход из жидкого состояния в газообразное при сверхкритических давлениях), а во втором – испарение. В этом случае установки правильнее было называть не газификаторами, а испарителями. Однако традиционно эти типы установок также называют газификаторами.

Существуют несколько типов газификационных установок:

- компрессорные газификаторы;
- теплые газификаторы;
- холодные газификаторы;
- газификаторы с насосом.

Каждый из типов характеризуется рядом достоинств и недостатков, и все они находят свое применение в определенных областях. В данной работе рассматривается стационарная газификационная установка типа СГУ-7КМ, которая относится к четвертому типу. Рассмотрим принцип ее работы более подробно.

Газификаторы высокого давления (работающие при давлении от 22 до 42 МПа) классифицируются на:

- стационарные;
- транспортные (нестационарные).

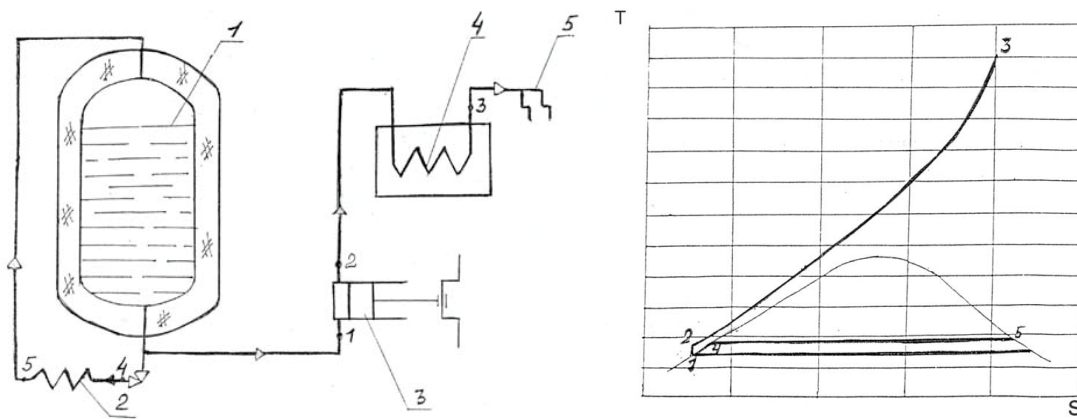


Рис. 2.1. Принципиальная схема газификационной установки с насосом и процессы газификации в TS-диаграмме:

1 - резервуар; 2 - испаритель подъема давления; 3 - насос сжиженного газа; 4 - продукционный испаритель; 5 – наполнительная рампа; 1-2 – процесс сжатия в насосе; 2-3 – процесс газификации жидкости; 4-5 – процесс испарения

Газификационные установки состоят из комплекта унифицированных блоков, включающих в себя цистерну, насос, испаритель подъема давления в цистерне, испаритель продукционный, узел выдачи продукта, щит управления. Например, на рис. 2.1 представлена принципиальная схема газификационной установки с насосом.

В режиме хранения криогенная жидкость в резервуаре находится при атмосферном давлении. В рабочем режиме газификатора перед включением в работу насоса часть криогенной жидкости подается в испаритель подъема давления, в котором она испаряется за счет теплообмена с окружающим воздухом. Образовавшийся в результате пар, поступает в паровое пространство резервуара, что, соответственно, приводит к повышению давления в нем. Затем криогенная жидкость при избыточном давлении 0.1 - 0.25 МПа направляется в насос. Жидкость при этом является не кипящей (охлажденной), что обеспечивает нормальную работу насоса. Кавитационный запас ΔT составляет от 1 К до 10 К.

В насосе происходит сжатие до заданного высокого давления, а затем жидкость поступает в продукционный испаритель, в котором газифицируется и нагревается до определенной температуры. Затем криогенный продукт направляется на наполнительную рампу для заполнения баллонов.

Насосы хорошо работают при охлаждении жидкости на $\Delta T = 5-8$ К. Например, при подъеме давления в резервуаре с жидким кислородом от 0,1 МПа до 0,2 МПа кавитационный запас составляет $\Delta T = 7$ К. При этом сжатие кислорода в насосе до 10 МПа приводит к увеличению температуры жидкости на 2-3 К. Чтобы давление при работе насоса не падало, необходимо чтобы освобождающийся от жидкости объем сразу занимал образовавшийся в испарителе пар.

2.2.1 Описание установки

Стационарные газификационные установки изготавливают в климатическом исполнении «У», категория размещения «4» (в закрытом помещении с искусственным регулированием климатических условий, для резервуара и насоса - категория размещения «2» (под навесом). Из 1 тонны жидкого кислорода получается 650 м³ газа (или 108 стандартных баллонов емкостью 40 л). Установка выдает с одной заправки емкости до 730 баллонов.

Общий вид установки изображен на рис. 2.2. Газификационная установка состоит из:

- криогенной цистерны с эффективной вакуумной изоляцией;
- насоса сжиженных газов;
- испарителя водяного с коллектором и термометрией;
- арматуры;
- электрического щита управления;
- приборов контроля и автоматики;
- трубопроводов и узла выдачи газообразного продукта;
- рампы наполнительной.

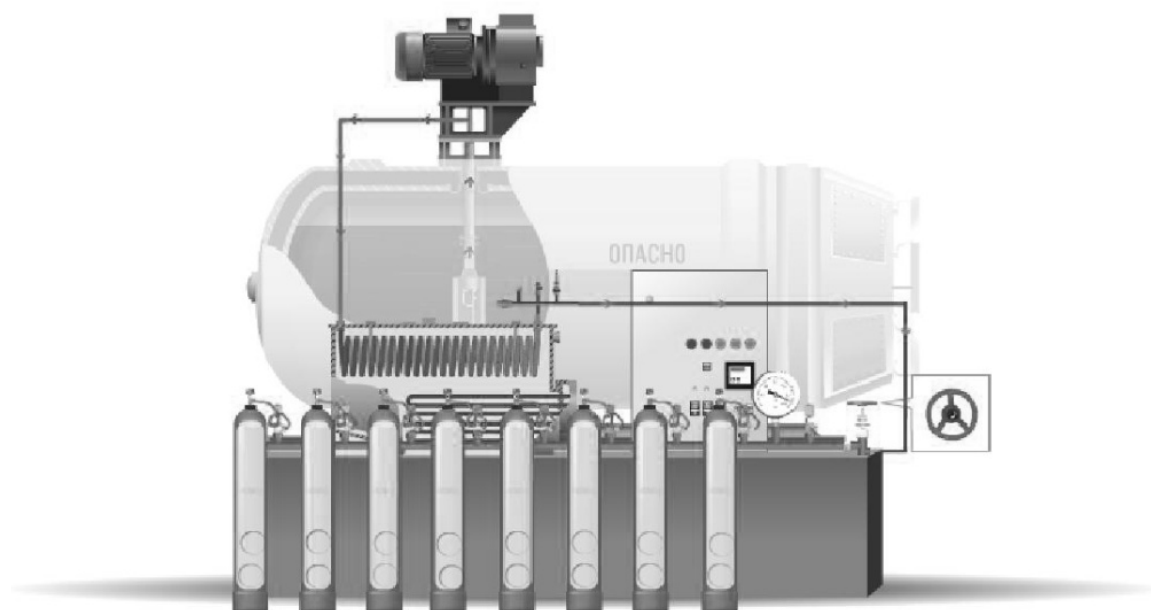


Рис. 2.2. Общий вид стационарной газификационной установки

Технические характеристики установки:

- максимальное давление газа при наполнении баллонов 15 МПа;
- температура производимого газа от 0 до 30 °С;
- пределы регулирования производительности от 5 до 100%;
- продолжительность пускового периода от момента включения испарителя до начала газификации не более 30 мин.

Установка СГУ-7КМ при заполнении емкостей способна производить:

- газообразного кислорода 280 м³/ч;
- газообразного аргона 275 м³/ч;
- газообразного азота 230 м³/ч.

Максимально допустимое количество жидкого продукта, заливаемого в сосуд резервуара:

- кислорода 1990 кг;
- азота 1430 кг;
- аргона 2400 кг.

Потери жидкого продукта при хранении (температура окружающей среды 293 К (20 °С) и барометрическое давление 0,1 МПа (760 мм рт. ст.) без учета воздействия солнечной радиации) не более:

- кислорода 0,0002 кг/с;
- азота 0,00021 кг/с;
- аргона 0,0002 кг/с.

Масса порожнего резервуара составляет 1490 кг.

Габаритные размеры резервуара:

- длина 3100 мм;
- ширина 2900 мм;
- высота 2065 мм.

Потребляемая мощность всей установки 68 кВт.

Ресурс до первого капитального ремонта составляет не менее 10000 ч.

2.2.2 Основные элементы СГУ-7КМ

2.2.2.1 Резервуар для транспортировки и хранения жидкого кислорода (азота, аргона) ТРЖК-7М.

Предназначен для использования в составе газификационных установок как емкость для длительного хранения жидкого кислорода (азота, аргона). Резервуар допускается к эксплуатации в условиях умеренного климата при температуре окружающего воздуха от плюс 50 до минус 50 °С. Порожний резервуар может транспортироваться любым видом транспорта, включая авиационный. Заполненный резервуар может транспортироваться автомобильным транспортом со скоростью не более 40 км/ч.

Резервуар состоит из внутреннего сосуда 1, наружного кожуха 2, двух испарителей подъема давления и пульта управления. Пространство между сосудом и кожухом заполнено порошковой изоляцией (аэрогель или смесь аэрогеля с перлитовым порошком) и отвакуумировано до остаточного давления не более 1 мм рт. ст.

В теплоизоляционном пространстве, в специальном кармане на внутреннем сосуде помещен адсорбент (силикагель марки КСМ или цеолит СаЕ-4В), который при заливе в резервуар жидкого продукта углубляет вакуум за счет поглощения остаточных газов до 0,001 мм рт. ст.

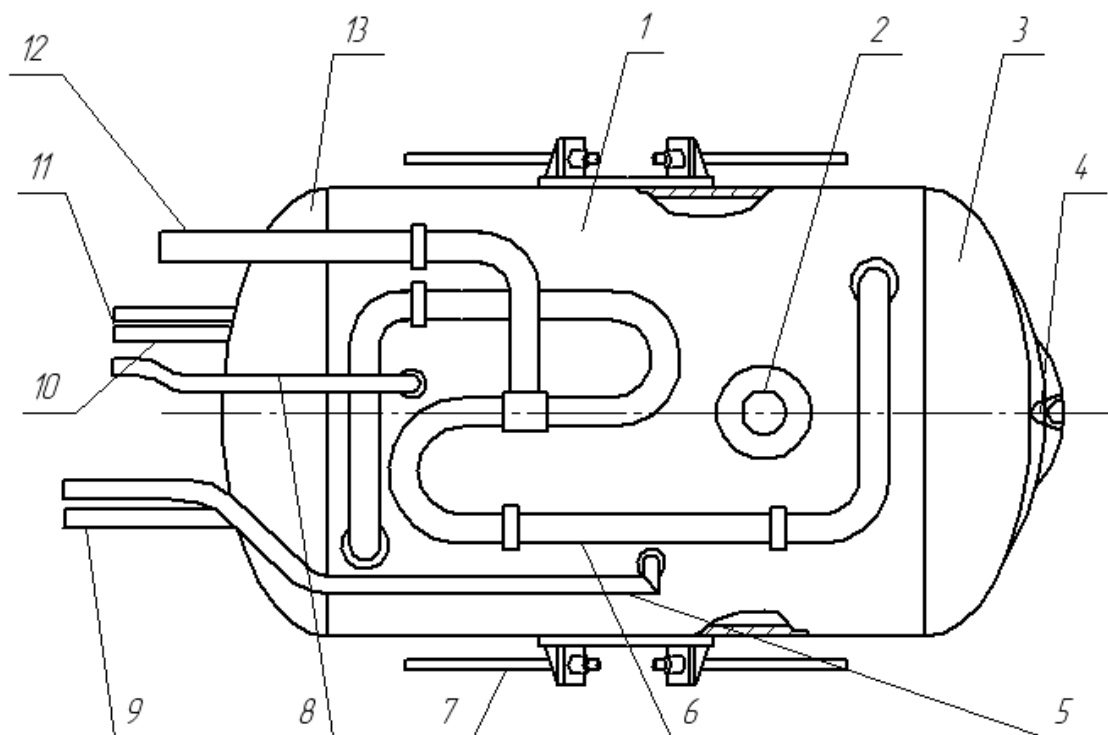


Рис. 2.3. Схема резервуара ТРЖК-7М (вид сбоку):
 1 - сосуд; 2 - кожух; 3 - крюк; 4 - днище заднее; 5 - силикагель; 6 - мембрана ко-
 жуха; 7 - вентиль сильфонный; 8 - пульт управления

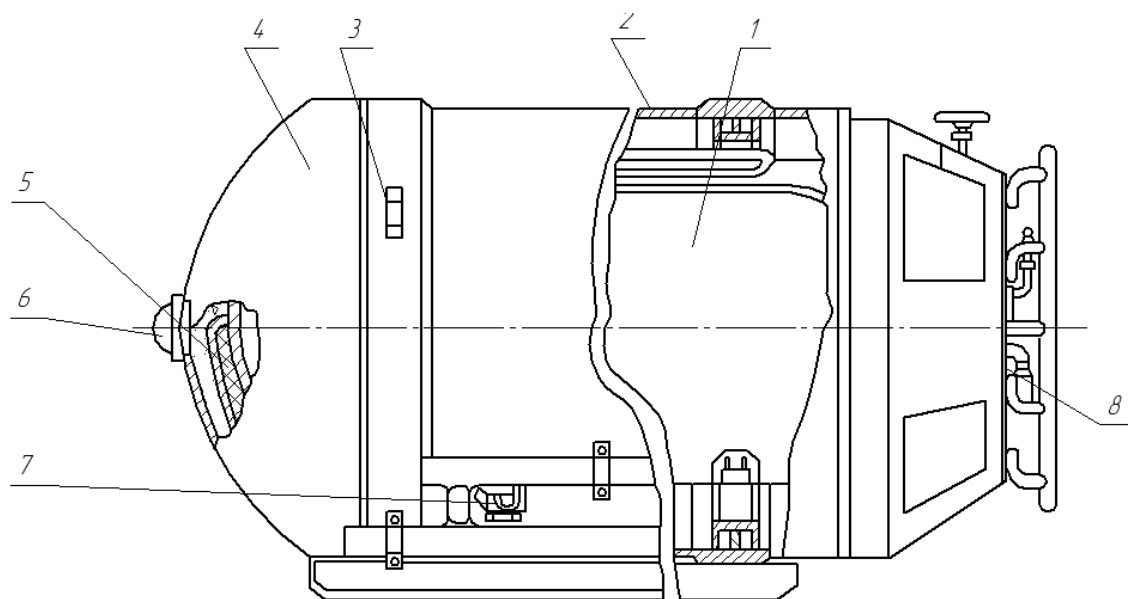


Рис. 2.4. Схема резервуара ТРЖК-7М (вид сверху):
 1 - обечайка; 2 - горловина; 3 - днище заднее; 4 - карман; 5 - труба наполнения-
 опорожнения; 6 - коллектор; 7 - растяжки; 8 - труба «УЖК» верх;
 9 - труба к испарителю; 10 - труба «УЖК» низ; 11 - труба к штуцеру выдачи;
 12 - труба газосброса; 13 - днище переднее

Внутренний сосуд выполнен сварным из листовой нержавеющей стали, и представляет собой емкость цилиндрической формы со сферическими днищами.

Для наполнения и опорожнения внутреннего сосуда к верхней его части подведена труба 5. В верхней части сосуда расположен газовый коллектор 6, через который осуществляется отвод в атмосферу испаряющегося при хранении продукта, а также подвод газообразного продукта из испарителей при выдаче рабочей жидкости.

Труба 9 предназначена для подачи жидкого продукта в испарители, труба 11 - к штуцеру выдачи, а труба 5 - для наполнения и опорожнения внутреннего сосуда. К верхней и нижней частям сосуда подведены трубки 8 и 10 для подключения к прибору УЖК - 5.

Сосуд установлен в кожухе на четырех текстолитовых опорах и удерживается в установленном положении продольными и поперечными растяжками, снабженными тарельчатыми пружинами.

Кожух резервуара выполнен из алюминиевого сплава, состоит из цилиндрической части и двух днищ и предназначен для размещения в нем внутреннего сосуда и теплоизоляции.

В верхней части заднего днища расположен люк, через который в пространство между сосудами засыпается изоляционный материал, а в карман внутреннего сосуда – адсорбент. После засыпки изоляционного материала и адсорбента люк закрывается предохранительной мембраной.

На заднем днище 4 (рис. 2.3) в качестве предохранительного устройства на случай возникновения давления в кожухе от проникновения рабочей жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство установлен узел 6 мембраны, которая при повышении давления в кожухе в пределах от 0,2 до 0,7 кгс/см² разрывается (прогибаясь наружу, прорезается ножом, установленным на фланце).

Мембрана изготавливается из медной фольги и защищена от повреждений снаружи крышкой, изнутри – решеткой.

Управление резервуарами осуществляется при помощи приборов и запорных устройств, размещенных на пульте управления, представленном на рис. 2.5.

На пульте управления установлены семь вентилях, указатель жидкого кислорода, манометр, предохранительный клапан, баллоны-компенсаторы, огнетушитель и два штуцера диаметром 16 мм, предназначенные – один для подсоединения к кислорододобывающим станциям, другой для заправки кислородных приборов. Для возможности осмотра трубопроводов на пульте управления имеются люки со съемными крышками. По центру пульта управления выведена гайка «РОТТа» для подсоединения шланга при наполнении или опорожении резервуара. На конусной части пульта управления справа расположена предохранительная мембрана сосуда, слева – предохранительные мембраны шланга диаметром 40 мм и рукава диаметром 16 мм. Пульт управления крепится к переднему днищу резервуара с помощью болтов через прокладку.

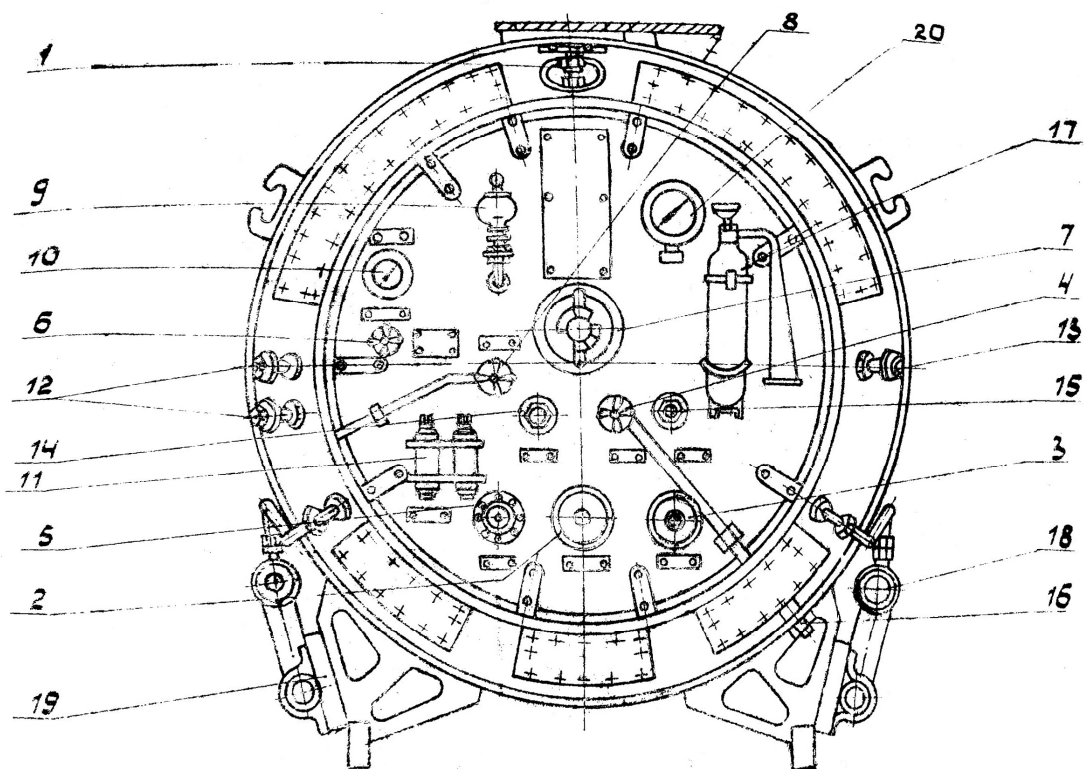


Рис. 2.5. Схема передней крышки резервуара ТРЖК-7М:

1 – вентиль наполнения-опорожнения; 2 – вентиль подачи жидкости в испарителе; 3 – вентиль газосброса; 4 – вентиль сброса газа на шланг; 5 – вентиль угловой запорный (выдача); 6 – вентиль трехходовой; 7 – гайка «РОТТ»; 8 – вентиль опорожнения рукава; 9 - предохранительный клапан; 10 – указатель уровня УЖК – 5; 11 – баллоны-компенсаторы; 12 и 13 – узел установки мембраны; 14 – штуцер выдачи; 15 – штуцер наполнения; 16 – штуцер газосброса; 17 – огнетушитель; 18 и 19 – испарители; 20 – манометр

В нижней части резервуара установлены два испарителя, предназначенные для создания и поддержания давления в сосуде при выдаче жидкого продукта. Испаритель состоит из двух параллельных медных труб, соединенных между собой. Каждый испаритель соединяется с внутренним сосудом двумя трубками, по одной из которых подводится жидкий продукт, по другой – отводится в верхнюю часть сосуда газ. Жидкий продукт попадает в испарители через вентиль за счет статического напора столба жидкости. Для продувки испарителей во время промывки и обезжиривания последние снабжены штуцерами с заглушками.

2.2.2.2 Насосный агрегат

Насосный агрегат включает в себя насос сжиженных газов 12НСГ, который предназначен для подачи жидкости под давлением в испаритель – газификатор с последующим ее испарением и наполнением емкостей и применяется в

составе газификационных установок. Работоспособность насоса с сохранением величин подачи обеспечивается при температуре окружающей среды от минус 40 °С до 40 °С и влажности воздуха 98 % при 35 °С.

Насос состоит из следующих составных частей:

- редуктор;
- кривошипно-шатунный механизм;
- цилиндрическая группа.

Насос представляет собой поршневую одноступенчатую машину одинарного действия с автоматическими клапанами. Цилиндрическая группа насоса, расположенная вертикально, устанавливается внутри резервуара с сжиженным газом.

Привод насоса осуществляется от асинхронного электродвигателя переменного тока. Вращательное движение электродвигателя замедляется редуктором и посредством кривошипно-шатунного механизма преобразуется в возвратно-поступательное движение поршня. Изменение величины хода поршня для регулирования подачи производится вручную при остановленном насосе.

При работе насоса происходит всасывание сжиженного газа, повышение давления сжиженного газа и его нагнетание в трубопровод. Всасывание происходит в период обратного хода плунжера. Всасывание начинается в момент, когда давление в рабочей полости насоса становится ниже давления в резервуаре с сжиженным газом, и заканчивается в конце обратного хода плунжера. При прямом ходе поршня в рабочей полости насоса происходит повышение давления. В момент, когда давление в рабочей полости становится выше давления в нагнетательном трубопроводе, начинается нагнетание сжиженного газа, которое заканчивается в конце прямого хода поршня.

2.2.2.3 Испаритель-газификатор

Испарители жидкости применяются на станциях наполнения сжатыми газами и являются составной частью газификационных установок. Испаритель изображен на рис. 2.6 и предназначен для изменения агрегатного состояния газа из жидкого состояния в газообразное и нагрев его до температуры, необходимой при наполнении данными техническими газами баллонов или других емкостей. Такой производственный испаритель представляет собой змеевик, выполненный из латунной трубки, заключенной в стальной кожух, наполняемый водой. Залив и слив воды производится через кран, расположенный в нижней части кожуха. Для контроля уровня воды имеется указатель уровня. Прогрев воды осуществляется 12-трубчатыми электронагревателями (ТЭНы) мощностью 58 кВт, смонтированными на боковых крышках испарителя.

Трубчатые электронагреватели разделены на три рабочие секции, разделённые функционально. Количество потреблённой электроэнергии зависит от заданной температуры газа на выходе, а также от количеств испарённого газа за

час. На коллекторе установлены предохранительный клапан, ЭКМ (электроконтактный манометр), датчик температуры газа. ЭКМ выполняет роль защитного устройства, которое через систему управления посылает управляющий сигнал для остановки работы насоса при достижении заданного давления в баллонах.

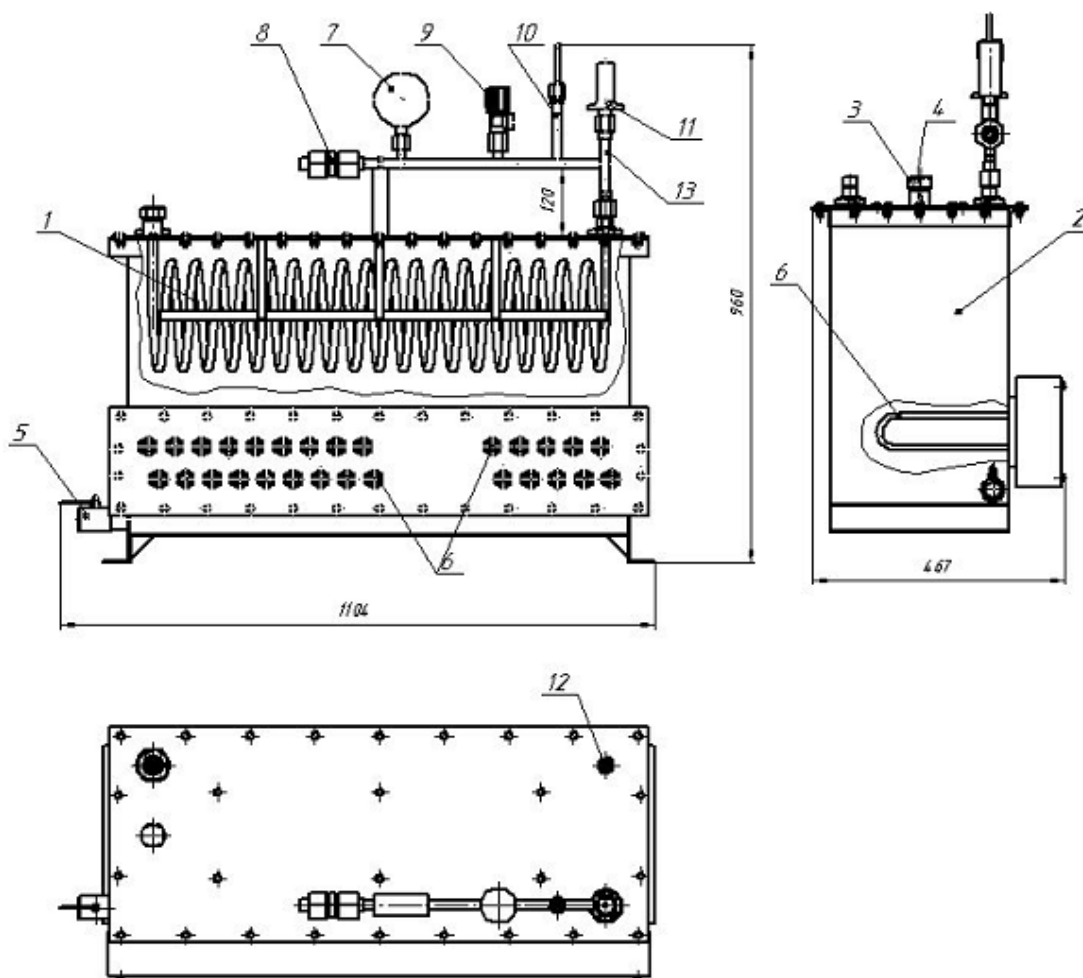


Рис. 2.6. Схема устройства производного испарителя:

1 – змеевик; 2 – кожух; 3 – заливная горловина; 4 – пробка; 5 – кран шаровый; 6 – электронагреватель; 7 – электроконтактный манометр; 8 – обратный клапан; 9 – продувочный вентиль; 10 – датчик температуры газа; 11 – предохранительный клапан; 12 – датчик температуры воды; 13 – коллектор

2.2.3 Принцип действия газификационной установки

Работа газификационной установки осуществляется следующим образом: сжиженный газ из резервуара поступает в насос, затем - в испаритель-змеевик, расположенный в емкости, заполненной водой. Вода нагревается с помощью электронагревательных элементов. Сжиженный газ в змеевике испаряется и подогрывается до 283-303 К (10-30 °С). После испарителя газ под давлением поступает в линию потребления, наполнительную рампу или реципиент.

Количество заливаемого в цистерну жидкого продукта визуально контролируется с помощью указателя уровня - УЖК. Давление в цистерне и узле выдачи измеряется с помощью манометров. Установки оснащены приборами автоматики для регулирования температуры воды в испарителе и отключения насоса при превышении максимально допустимого конечного давления газа.

2.2.3.1 Технологическая схема выдачи жидкого продукта и газификации

Заполнение и опорожнение резервуара осуществляется по вертикальной трубе, доходящей почти до дна резервуара. Подача жидкого газа производится по трубопроводу от блока разделения за счет избыточного давления в работающем блоке. На линии устанавливается вентиль 1 и гайка РОТТ 7 для присоединения гибкого шланга. При открытом вентиле 1 жидкий газ через штуцер «Наполнение» 15 поступает в резервуар. Образующийся при охлаждении резервуара пар сбрасывается в атмосферу при открытом вентиле 3 «Газосброс» через штуцер газосброса 16. Заполнение резервуара контролируется указателем уровня 10 УЖК-5.

Шланг состоит из двух коаксиально (соосно) расположенных гофрированных труб с опорными элементами из фторопласта без использования специальной изоляции (например, в шлангах для жидкого водорода используется высоковакуумная изоляция). После заполнения резервуара закрывается вентиль слива на блоке разделения, закрывается вентиль 1 на линии наполнения, оставшаяся жидкость испаряется, и давление за вентилем может быстро возрасти и разорвать шланг. Чтобы это не произошло, необходимо слить жидкость с помощью вентиля сброса давления из шланга (продувка шланга) 4. На этой линии устанавливается предохранительная мембрана, которая срабатывает при давлении 0,3 – 0,45 МПа.

Для выдачи криогенной жидкости потребителю на практике используют три способа:

- самотек (используется только для опорожнения небольших сосудов);
- откачка с помощью насосов (эффективный способ опорожнения крупных емкостей);
- передавливание.

В газификационной установке СГУ-7КМ слив жидкости осуществляется передавливанием. Для этого предусмотрены испарители подъема давления 18 и 19. При открытии вентиля испарителя 2 под действием статического столба криогенная жидкость попадает в испарители. В нем циркулирующая жидкость постепенно испаряется за счет теплопритока из окружающей среды. Образовавшийся пар поступает в газовое пространство резервуара, и давление пара над жидкостью возрастает. Поступление жидкости в испаритель регулируется вентилем 2. В резервуаре создается избыточное давление, обычно не более 0,25 МПа. При превышении давления в резервуаре необходимо открыть вентиль газосброса 3. Во время хранения жидкости этот вентиль открыт всегда.

При таком способе передавливания жидкости вместо газа, полученного при испарении части хранимой жидкости, можно использовать вспомогательный газ с более низкой температурой кипения, чем у хранимой жидкости. Так, для передавливания кислорода применяют азот или гелий, для жидкого водорода – гелий, для жидкого метана – азот.

Давление во внутреннем сосуде показывает манометр 20, установленный на газовой линии. На этой же линии устанавливается предохранительный клапан 9 и разрывная мембрана. Предохранительный клапан настроен таким образом, чтобы давление во внутреннем сосуде не могло превысить допустимого избыточного давления более, чем на 10 %. Разрывная мембрана является дополнительным или перестраховочным средством безопасности, которое срабатывает, когда предохранительный клапан не имеет достаточной пропускной способности и не сбрасывает избыточное давление из внутреннего сосуда или, если клапан не действует из-за обмерзания. Разрывная мембрана устанавливается параллельно с предохранительным клапаном 9 и срабатывает при превышении давления на 20 % выше расчетного для внутреннего сосуда. После сброса избыточного давления клапан закрывается, а мембрану, после того как она разорвется, необходимо заменить.

При выдаче жидкости вентиль газосброса 3 необходимо закрыть, вентиль наполнения-опорожнения 1 открыть, и после того, как давление в резервуаре повысится, открыть вентиль 5 на линии выдачи (либо к насосу, либо к какой-то емкости).

При газификации рабочая жидкость через открытый вентиль 5 поступает к цилиндрической группе насоса. Часть жидкости, проходя через фильтр, поступает к всасывающему клапану насоса и нагнетается насосом в змеевик-испаритель высокого давления. В змеевике испарителя продукт переходит в газообразное состояние и через обратный клапан поступает в трубопровод потребителя. Другая часть жидкости поступает в рубашку цилиндрической группы. Пары жидкости, образующиеся в результате нагрева при работе насоса, возвращаются в резервуар.

Во время работы установки необходимое давление в резервуаре частично поддерживается за счет испарения жидкости в рубашке насоса. В случае превышения давления в резервуаре выше 0,25 МПа его необходимо сбрасывать открытием вентиля «Газосброс».

При газификации осуществляется визуальный контроль за параметрами газообразного продукта. Измеряются давление нагнетания, температура газа и температура воды в испарителе. Показывающие приборы установлены на электрощите управления.

Для предохранения системы от превышения давления на линии нагнетания предусмотрен предохранительный клапан и электроконтактный манометр, отключающий двигатель насоса при достижении давления 17,0 МПа. В случае отказа ЭКМ срабатывает предохранительный клапан.

Поддержание температуры газообразного продукта в заданных пределах: от 5 до 30 °С достигается за счет автоматического включения и отключения первой секции нагревательных элементов испарителя по команде термореле ТР-ОМ5-03, датчик которого смонтирован в трубопроводе нагнетания.

При повышении или занижении температуры воды от 75 °С в испарителе, термореле ТР-ОМ5-06 автоматически отключает или включает обе секции подогревателя испарителя.

Уровень жидкости в резервуаре контролируют по мембранному указателю уровня жидкости (УЖК) 10 (рис. 2.7).

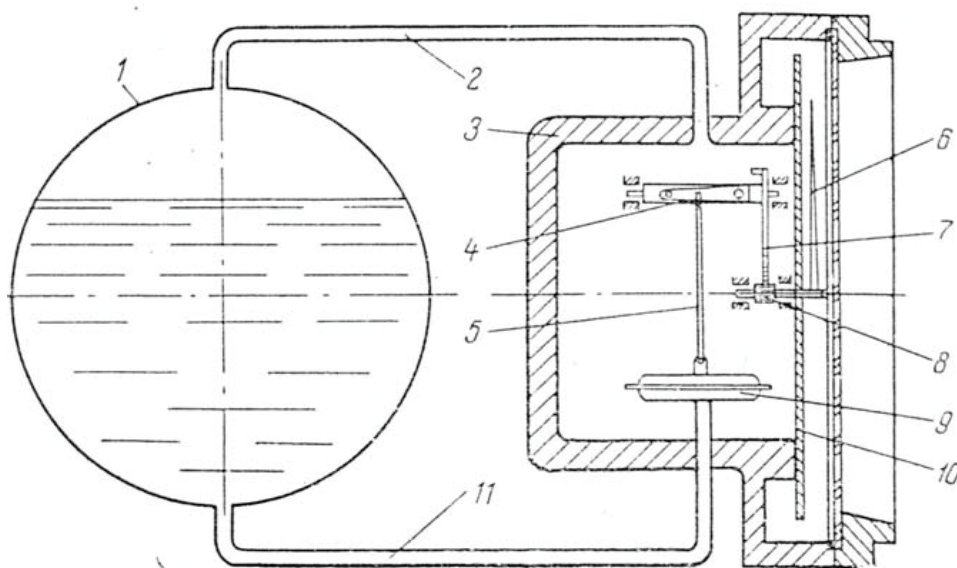


Рис. 2.7. Схема мембранного указателя уровня жидкости:

1 – резервуар; 2, 11 – трубки; 3 – корпус; 4 – ось; 5 – тяга; 6 – стрелка; 7 – зубчатый сектор ; 8 – шестерня ; 9 – мембранная коробка ; 10 – шкала

Мембранный указатель уровня, связанный с резервуаром по пару и жидкости, преобразует давление столба жидкости в перемещение мембраны, крышка которой выгибается. Герметически закрытый корпус прибора 3 сообщается с верхней частью резервуара 1 через трубку 2, а внутренняя часть мембранной коробки 9 соединена трубкой 11 с нижней частью резервуара. Давление внутри мембранной коробки больше давления в корпусе на величину давления, создаваемого столбом жидкости в резервуаре. Под действием этой разности давлений верхняя стенка коробки 9 выгибается. Крышка коробки тягой 5 соединена с осью 4, на которой укреплен зубчатый сектор 7. Этот сектор сцеплен с шестерней 8, на оси которой находится стрелка 6. Когда высота столба жидкости увеличивается, крышка мембранной коробки выгибается вверх и, поворачивая ось с сектором, вращает шестерню.

При эксплуатации в линиях, идущих от резервуара к прибору, могут возникать резкие колебания давления (например, в процессе заполнения - опорожнения, при транспортировке и т.д.). Для защиты чувствительной мембраны от

таких воздействий указатель уровня соединяется с резервуаром через специальный трехходовый вентиль 6. Наряду с этим колебания давлений гасятся баллонами - компенсаторами 5, 11. Включение прибора в работу происходит периодически (только во время измерения уровня).

Таблица 2.1

Нормы технологического режима

Параметр	Значение
Давление в резервуаре	от 0,7 до 2,4 кгс/см ² .
Давление нагнетания газообразного кислорода	не более 17,0 МПа.
Температура сжатого кислорода	от 0 до 30 °С.
Температура воды в испарителе	не выше 75 °С.
Уровень жидкого кислорода в резервуаре	не менее 1,3 ед. по прибору УЖК

2.3 Выполнение работы

1. Ознакомится с назначением, типами и принципом действия газификационных установок используя описание в методическом руководстве и стенд.

2. Изучить устройство стационарной газификационной установки типа СГУ-7КМ.

3. Изучить устройство и особенности работы резервуара для транспортировки и хранения жидких газов ТРЖК-7М, насоса сжиженных газов 12НСГ, испарителя-газификатора, мембранного указателя уровня жидкости используя описание в методическом руководстве и стенд.

4. Рассмотреть технологическую схему выдачи жидкого продукта и газификации.

5. Составить отчет.

2.4 Контрольные вопросы

1. Что такое газификационная установка? Какие типы газификаторов Вы знаете?

2. Основные параметры, конструкция и принцип действия установки СГУ-7КМ и ее составляющих?

3. Контрольно-измерительная, запорная и предохранительная аппаратура, используемая в установке СГУ-7КМ?

4. Последовательность операций технологического процесса заполнения и опорожнения криогенного резервуара, а также процесса газификации?

Лабораторная работа №3. Гелиевая ожижительная установка Г-8

3.1 Цель работы

Изучение принципа действия, конструкции и правил эксплуатации гелиевой ожижительной установки типа Г-8 и ее составных частей.

3.2 Назначение установки

Гелиевая ожижительная установка типа Г-8 предназначена для ожижения газообразного гелия. Она имеет холодильный цикл детандерного типа: предварительное охлаждение гелия жидким азотом, расширение в поршневом детандере от 25 атм. до 0,3 атм. и дросселирование сжатого гелия.

Таблица 3.1
Основные технические характеристики Г-8

Параметр	Значение
1. Производительность компрессора	96 м ³ /ч
2. Рабочее давление	от 21 до 24 атм.
3. Производительность установки по скорости накопления жидкого гелия в сборнике	8 л/ч
4. Расход жидкого азота:	
- на запуск ожижителя из теплого состояния до момента начала ожижения	20 л
- собственно ожижение	10 л/ч
- для вспомогательных нужд (блок очистки гелия, ловушки)	5 л/ч
5. Время запуска ожижителя из теплого состояния до момента начала ожижения	2 ч
6. Продолжительность рабочей компании	5 суток
7. Потребляемая компрессорами мощность	32 кВт

3.3 Теоретические сведения

3.3.1 Получение гелия и его использование

Гелий - атомный газ без цвета и запаха, плотностью 0,178 кг/м³. Плотность гелия невелика, а теплоемкость значительна, по этим характеристикам гелий уступает только водороду. Газообразной гелий обладает высокой удельной теплопроводностью и является хорошим теплоносителем. Поскольку гелий инертный газ, то обращение с ним значительно проще, чем с водородом. Гелий достаточно точно подчиняется закономерностям идеального газа в очень широком диапазоне температур и давлений. В области температур ниже 20 К свойства ре-

ального газа уже выражены вполне четко. Гелий обладает наиболее низкой температурой конденсации ($T = 4,215 \text{ К}$ при атмосферном давлении) и это одна из причин его широкого использования в криогенной технике.

Температура инверсии гелия $\sim 40 \text{ К}$, поэтому только с помощью жидкого водорода можно обеспечить практически рациональное предварительное охлаждение для ожижения гелия методом дросселирования. Дроссель-эффект резко возрастает с понижением температуры; значение давления обеспечивающее наибольшее его значение $30 - 15 \text{ атм.}$ в интервале температур $20-10 \text{ К}$. Откачкой паров над жидкостью до $0,12 \text{ мм рт. ст.}$ температура кипения гелия может быть снижена до 1 К . Дальнейшее понижение температуры таким образом ограничивается возможностями вакуум-насосов, из-за чрезвычайно низкой упругости паров He. Так, например, при температуре $0,1 \text{ К}$ равновесное давление паров составляет всего $4,2 \cdot 10^{-32} \text{ мм рт. ст.}$ Теплота испарения гелия составляет $2,8 \text{ кДж/л}$ и является минимальной (кроме He³) для всех существующих жидкостей. Это обстоятельство является причиной серьезных трудностей, возникающих при производстве, хранении и использовании жидкого гелия.

3.3.2 Способы ожижения гелия

3.3.2.1 Циклы с дросселированием

Классическая схема ожижения гелия включает две ступени предварительного охлаждения с помощью жидких азота (N₂) и водорода (H₂) (см. рис. 3.1). Жидкий азот кипит в теплообменнике при атмосферном давлении, а водород под вакуумом. Это позволяет обеспечить температуру предварительного охлаждения гелия вплоть до $15-16 \text{ К}$, и получить наибольшее значение дроссель-эффекта.

Рассмотрим схему такого трехступенчатого цикла в ее простейшем варианте, когда жидкие N₂ и H₂ доставляются со стороны. Поток гелия из компрессора, пройдя последовательно все теплообменники, дросселируется в дроссельном вентиле и поступает в сборник жидкости. Образовавшаяся жидкость (x) отводится, а обратный поток ($1-x$), отдавая тепло в теплообменниках, возвращается в компрессор, в линию всасывания которого добавляется газообразный гелий в количестве, равном отводимой жидкости. Пары азота и водорода охлаждают поток сжатого гелия и через теплообменники выводятся из ожижителя.

Простота, отсутствие движущихся частей в блоке ожижителя, надежность работы, являются существенными преимуществами установок такого типа. Однако наличие водорода в значительной степени снижает их достоинства.

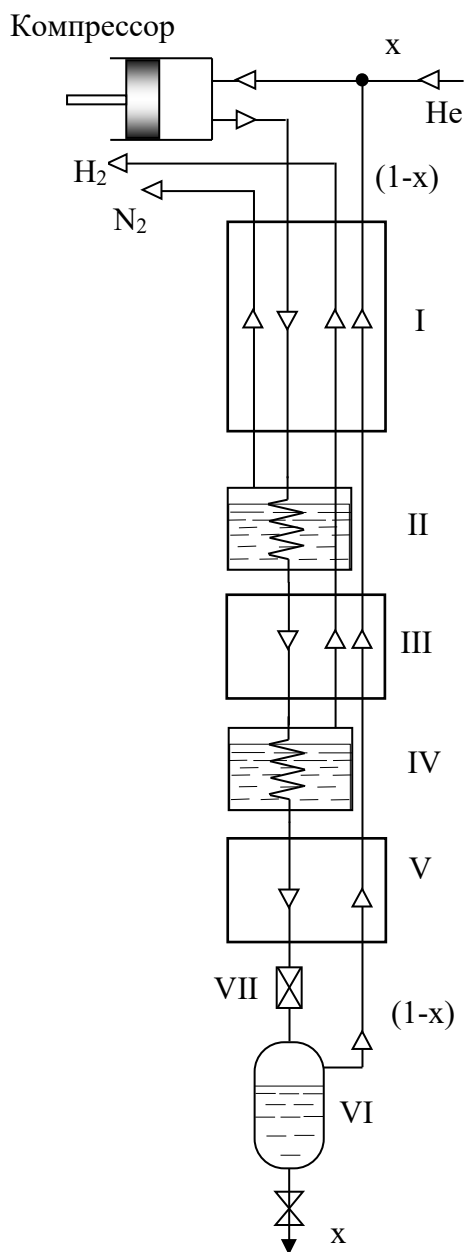


Рис. 3.1. Схема цикла ожижения гелия с дросселированием:
 I, III, V - теплообменники;
 II, IV - ванны предварительного охлаждения соответственно с жидким азотом и водородом;
 VI- сборник жидкого гелия;
 VII- дросселирующее устройство

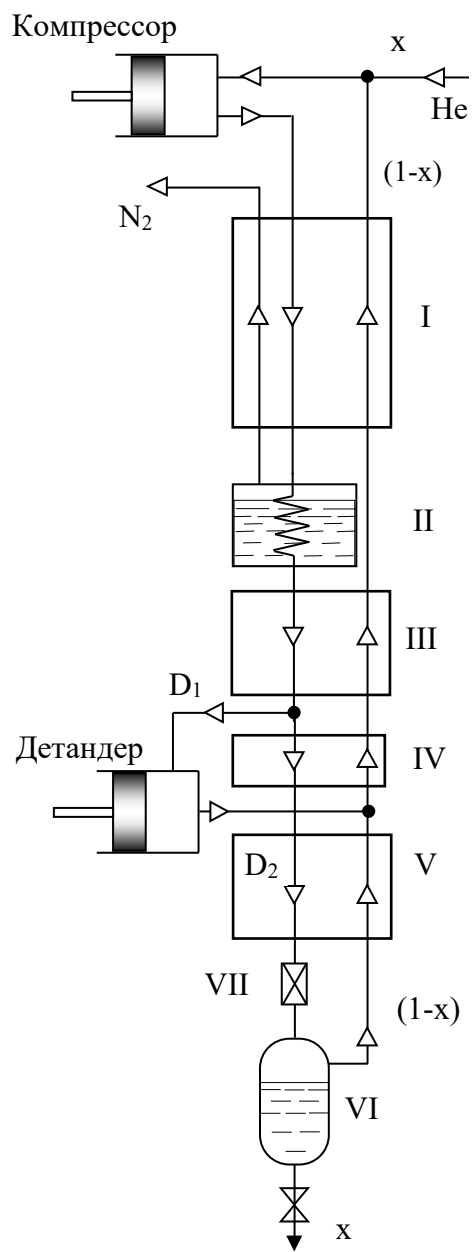


Рис. 3.2. Схема цикла ожижения гелия с детандером:
 I, III, IV, V - теплообменники;
 II - ванна предварительного охлаждения с жидким азотом;
 VI - сборник жидкого гелия;
 VII- дросселирующее устройство

3.3.2.2 Детандерные циклы

Предварительное охлаждение жидким водородом можно заменить детандером, в котором расширяется часть потока сжатого гелия. Впервые идея о создании гелиевого ожижителя с детандером была практически осуществлена П. Капицей в 1934 г. Схема такого цикла представлена на рис. 3.2. В качестве первой ступени каскада остается азотная ванна предварительного охлаждения; водородная ступень заменена детандерной, на нижней ступени остается дросселирование. Помимо исключения водорода, преимуществом данной схемы является использование термодинамически более эффективного процесса в детандере. Гелий из компрессора, пройдя теплообменник I, азотную ванну II и теплообменник III, делится на два потока: D_1 поступает в детандер, а D_2 , пройдя теплообменники IV и V, дросселируется в сборник. Поток D_1 расширяется в детандере. Вследствие неплотности поршневой пары могут иметь утечки гелия (достигают от 2 до 6%); эти утечки направляются в линию обратного потока. После расширения в детандере температура гелия составляет от 9 до 12 К; этот уровень температуры ниже, чем при водородном охлаждении, и обеспечивает большую величину дроссель-эффекта. Схемы подобного типа получили большое распространение. Основным недостатком таких ожижителей является меньшая надежность, связанная с работой поршневой пары и клапанов детандера.

3.3.3 Описание схемы и аппаратов установки Г-8

Для перевода гелия в жидкое состояние его необходимо охладить (при атмосферном давлении) до температуры 4,2 К. Для этого в ожижителе используется охлаждающий эффект, получающийся при дросселировании газообразного гелия, предварительно охлажденного жидким азотом и расширении в поршневом детандере с давления 22 атм. до 0,5 атм. с отдачей внешней работы.

Газообразный гелий из газгольдера 1 (рис. 3.3) для чистого газа поступает в поршневой компрессор 2, где сжимается до необходимого рабочего давления гелиевого холодильного цикла, проходит тщательную очистку от смазочного масла в блоках маслоотдачи 3, после чего поступает в ожижитель 4. В ожижителе одна часть гелия проходит гелиевую секцию теплообменника, в котором охлаждается обратным потоком гелия, а остальной гелий идет в азотную секцию теплообменника, где охлаждается газообразным азотом.

Далее эти два потока направляются в змеевики, погруженные в азотной ванне, где происходит охлаждение сжатого гелия жидким азотом.

Из азотной ванны гелий высокого давления поступает на второй гелиевый теплообменник, после которого оба потока гелия соединяются в коллекторе и часть гелия направляется в поршневой детандер, где расширяется до давления 0,3 атм. и охлаждается до температуры порядка 12 К.

Остальная часть прямого потока гелия охлаждается в третьем и четвертом теплообменниках, расширяется в дроссельном вентиле и частично ожижается.

Жидкость накапливается в сборнике, откуда периодически сливается в сосуд Дьюара, а газ, отдав свой холод в теплообменниках вновь поступает на всасывание в компрессор.

Подпитка системы чистым гелием осуществляется из рампы чистого гелия 5, или из рампы технического гелия после его осушки и очистки в блоке осушки 6. Осушка гелия производится силикагелем, а очистка активированным углем при температуре жидкого азота. Блок очистки 6, обычно состоит из двух попеременно работающих ветвей, каждая из которых включает в себя осушитель и очиститель. Регенерация абсорбентов производится путем нагрева их электрическими подогревателями с одновременной откачкой аппаратов вакуумным насосом.

Хранение газообразного гелия производится в баллонах рампы 5, куда можно производить закачку гелия из системы компрессора (на технологической схеме не показано).

В установке предусмотрена возможность использования гелия, возвращаемого из лаборатории.

Этот газ собирается в газгольдере технического гелия (на технологической схеме не показано), а затем через блок очистки гелия периодически перекачивается вакуум-насосом в газгольдер чистого гелия.

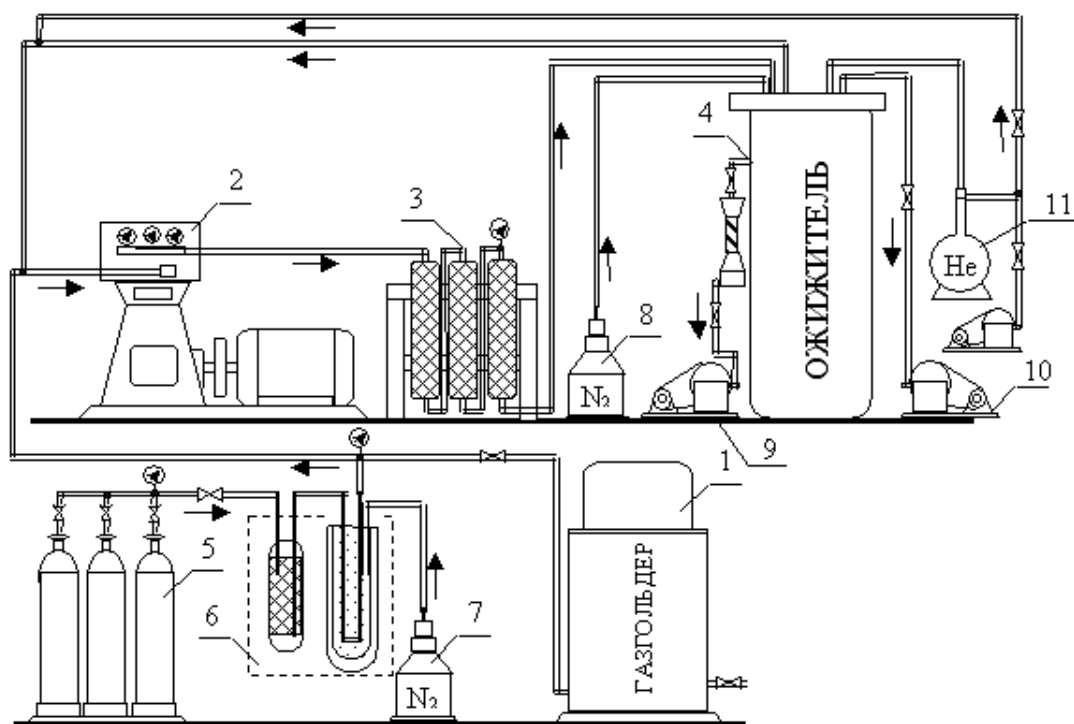


Рис. 3.3. Упрощенная технологическая схема гелиевого ожижителя Г-8 с детандером:

- 1 - газгольдер; 2 - компрессор; 3 - блок очистки от масла; 4 - ожижитель;
 5 - баллоны с гелием; 6 - блок очистки и осушки; 7, 8 - сосуды Дьюара с азотом;
 9, 10 - вакуум насосы; 11 - сосуд Дьюара с гелием

Теплоизоляция ожижителя производится созданием в кожухе ожижителя высокого вакуума диффузионным насосом 7 типа ЦВЛ-100С. Вакуумирование внутреннего пространства ожижителя осуществляется вакуум-насосом 8 типа РВН-20.

3.3.3.1 Блоки маслоотделителя

Блоки маслоотделителя 3 установленные после компрессора предназначены для полной очистки от масла сжатого гелия перед его подачей в ожижитель. Он состоит из маслоотделителя высокого давления, угольного адсорбента и необходимой арматуры.

Маслоотделитель высокого давления представляет собой стальную трубу емкостью 5,8 литра, рассчитанную на работу при давлении гелиевого цикла. Сжатый газ подается по центральной трубке в нижнюю часть маслоотделителя, где происходит резкое изменение скорости и направления движения газа. В результате этого отделяются унесенные газом капельки масла. После этого газ движется через ряд металлических сеток, предназначенных для дополнительного улавливания масла, и, через верхнюю боковую трубу, выходит из маслоотделителя. Скопившееся в нижней части трубы масло периодически сливается через имеющийся внизу вентиль.

В адсорбере высокого давления происходит окончательная очистка сжатого гелия от паров перед подачей газа в ожижитель. Очистка производится путем поглощения (при комнатной температуре) паров масла поверхностью неглазурованных керамических колец Рашига, которыми заполнен адсорбер. Сжатый газ входит снизу, проходит керамические кольца Рашига, ватный фильтр и выходит через нижний штуцер.

3.3.3.2 Блок очистки

Блок очистки 6 предназначен для очистки технического гелия перед его поступлением на ожижение. Газ последовательно проходит через осушитель, очиститель и очищенный поступает в газгольдер.

Осушитель представляет собой медный цилиндрический сосуд, наполненный силикагелем марки КСМ между верхней и нижней решетками. Технический газ проходит снизу-вверх через слой силикагеля, осушается и направляется на очистку от примесей воздуха. Количество силикагеля в осушителе равно один литр. Осушитель может работать при давлении 1,1 атм.

Очиститель состоит из угольного адсорбера и змеевика, навитого из двух медных трубок $\varnothing 12 \times 1$ мм. Змеевик служит для лучшего использования холода жидкого азота, уменьшая его расход. Угольный адсорбер по конструкции одинаков с осушителем, заполняется активированным углем марки СНТ в количестве 1,6 литра. Для очистки газообразного гелия от примеси воздуха адсорбцией на угле необходимо угольный адсорбент охлаждать до температуры порядка 80 К.

Для этого его погружают в металлический сосуд Дьюара, наполненный жидким азотом.

Механические примеси (угольная пыль, силикагельная пыль) удаляется путем фильтрации в фильтрах, наполненных ватой.

3.3.3.3 Блок ожижителя

Блок ожижителя состоит из теплообменников, сборника жидкого гелия, коммуникаций, арматуры, щита приборов и опорной рамы.

Теплообменные аппараты заключены в металлическом сосуде Дьюара 4 (см. рис. 3.4), вакуумное пространство которого откачивается насосами.

Поршневой детандер 1 смонтирован внутри ожижителя.

Механизм движения и привод к детандеру размещены на крышке и стойке ожижителя. Щит приборов крепится к стойке ожижителя.

Первый теплообменник 5 выполнен в виде цилиндрической емкости, внутри которой на внутреннюю обечайку из нержавеющей стали навит змеевик из оребренной медной трубки, по которой проходит прямой поток гелия. Обратный поток гелия идет по межтрубному пространству. Оребрение трубки изготавливается путем механической накатки гладких медных трубок $\varnothing 8 \times 1,5$ мм.

Оребрение трубок увеличивает коэффициент теплопередачи со стороны обратного потока гелия.

Наружная обечайка теплообменника выполнена из тонколистовой нержавеющей стали, она плотно натянута на трубки и имеет паяный шов.

Сверху и снизу теплообменника имеются крышки с отверстиями, через которые трубки выводятся к коллекторам. На наружную обечайку навита азотная секция теплообменника, которая конструктивно выполнена по типу «труба в трубе».

По вакуумной оребренной медной трубке проходит прямой поток гелия. В кольцевом пространстве движется газообразный азот, испаряющийся в азотной ванне, которая охлаждает прямой поток гелия.

На трубках входа и выхода прямого потока гелия из ожижителя установлены термометры, с помощью которых измеряется недорекуперация.

Азотная ванна 6 представляет собой емкость с змеевиковыми трубками.

Для залива жидкого азота в ванну на крышке ожижителя смонтированы вентиль налива азота 2. Для контроля уровня жидкости в ванне на щитке приборов установлен указатель уровня. Второй, третий и четвертый гелиевые теплообменники (9, 10) выполнены по типу «труба в трубе». По внутренней оребренной трубке и по внешней гладкой трубке идет прямой поток гелия.

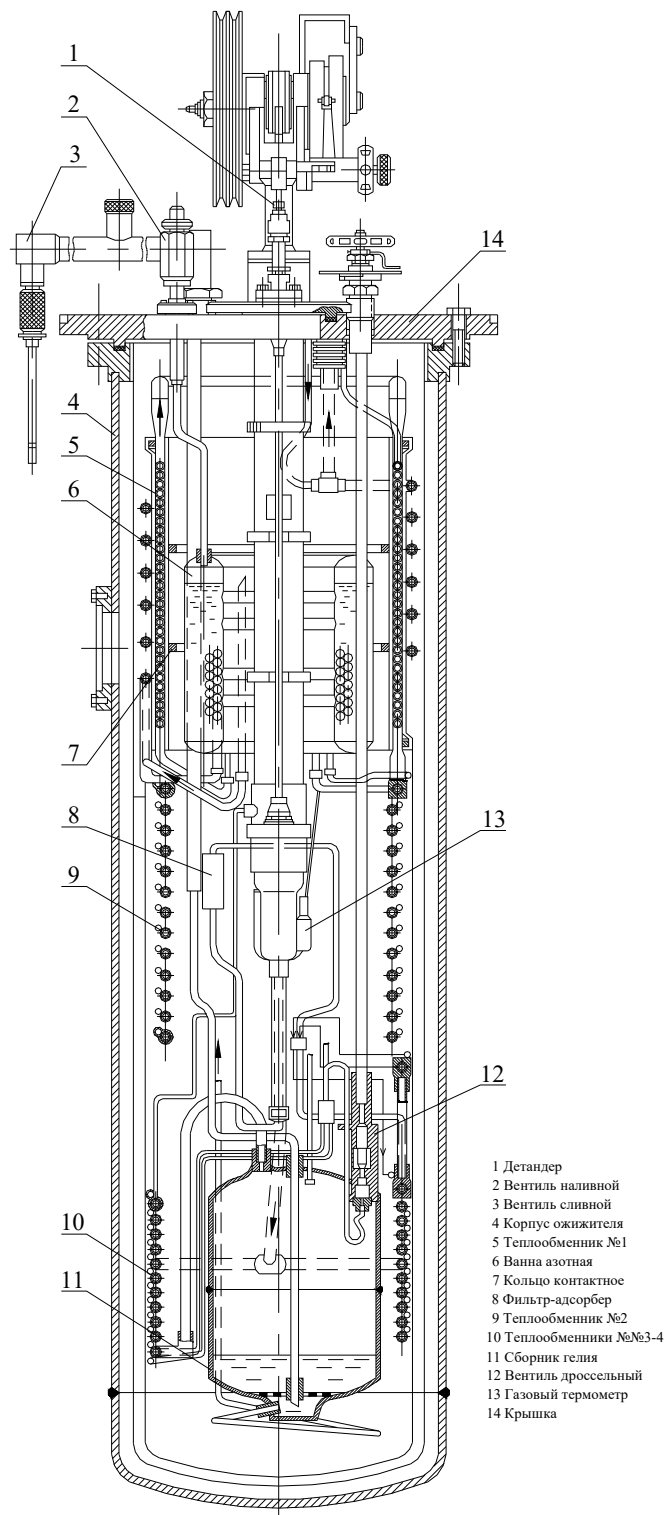


Рис. 3.4. Схема устройства блок оживителя:

1 – детандер; 2 – вентиль наливной; 3 – вентиль сливной; 4 – корпус оживителя; 5 – теплообменник 1; 6 – ванна азотная; 7 – кольцо контактное; 8 – фильтр-адсорбент; 9 – теплообменник 2; 10 – теплообменники 3 и 4; 11 – сборник гелия; 12 – вентиль дроссельный; 13 – газовый термометр; 14 – крышка

В кольцевом пространстве третьего теплообменника движется обратный поток из детандера, а в кольцевом пространстве четвертого теплообменника – проходит газообразный гелий из сборника жидкого гелия.

Для улучшения теплопередачи внешняя трубка прямого потока и трубка обратного потока спаяны между собой мягким припоем.

Сборник жидкого гелия 11 – сосуд, емкостью 10 литров, выполнен из меди. В верхней части сборника имеется штуцер, к которому припаян кожух дроссельного вентиля. В нижней части сборника имеется трубка, по которой гелий сливается в сосуд Дьюара. Для наблюдения и контроля уровня жидкости в сборнике на щитке установлен указатель уровня жидкости гелия.

Кожух ожижителя представляет собой двустенный сосуд. Внешняя обечайка выполнена из листовой меди. Внутренняя обечайка изготавливается составной: из нержавеющей стали и меди. В нижней части кожуха между обечайками располагается азотный экран, имеющий контакт с азотной ванной.

В сосуде Дьюара поддерживается вакуум от 10^{-5} до 10^{-6} мм рт. ст. Для откачки полости в блоке установлен диффузионный насос ЦВЛ-100С и вакуумнасос ВН-461М.

Сверху кожуха установлена крышка, на которой монтируется поршневой детандер, выводы гелиевых и азотных труб, вакуумные выводы проводов, трубки к приборам и датчикам.

На щите приборов установлены мановакуумметры для измерения давления гелия перед детандером и перед дросселем, газовые термометры для замера температуры перед детандером, после детандера и до дроссельного вентиля, указатели уровня азота в ванне и жидкого гелия в сборнике.

3.4 Выполнение работы

1. Ознакомится с принципами работы ожижительных установок, использующих детандерный и дроссельный циклы.

2. Изучить технологическую схему установки Г-8, используя описание методического руководства и стенд.

3. Изучить конструкции узлов установки Г-8, расположенные в лаборатории: компрессор ступени предварительной подготовки рабочего тела, теплообменников компрессора, блока очистки от масла, блока очистки и осушки газа, используя описание методического руководства и стенд.

4. Изучить схему ожижителя установки Г-8, используя описание методического руководства и стенд.

5. Изучить конструкцию ожижителя: конструкцию теплообменников, конструкцию сборника жидкого гелия.

6. Изучить щиток приборов установки Г-8.

7. Записать назначение, основные параметры и принцип действия установки Г-8.

8. Зарисовать принципиальную и технологическую схему установки Г-8.

3.5 Контрольные вопросы

1. Назовите особенности гелия, как рабочего агента криогенных газовых машин.
2. Нарисуйте схему цикла криогенной установки для ожижения гелия с водородной ступенью предварительного охлаждения.
3. Нарисуйте схему цикла криогенной установки для ожижения гелия с детандерной ступенью предварительного охлаждения.
4. Назовите основные блоки и их назначение
5. Нарисуйте схему ожижителя гелиевой установки Г-8 и поясните принцип ее действия.

Библиографический список

1. Новотельнов В.Н. Криогенные машины / В.Н. Новотельнов, Суслов А.Д., Полтараус В.Б. – Спб.: Политехника, 1991. – 335 с.
2. Епифанова В.И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения / В.И. Епифанова. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.
3. Микулин Е.И. Криогенная техника / Е.И. Микулин. – М.: Машиностроение, 1969. – 272 с.
4. Цветковская Л.Н. Газификационные установки / Л.Н. Цветковская – Одесская государственная академия холода, 2001. – 48 с.
5. Кутепов А.М. Практикум по процессам и аппаратам химической технологии. Изд. 2-е, перераб. / сост.: А.М. Кутепов, Д.А. Баранов, В.В. Бутков, А.З. Волынец, А.В. Вязьмин, А.С. Жихарев, В.А. Орлов, О.В. Пирогова, Г.Я. Рудов, И.И. Сидельников, Г.П. Соломаха, И.В. Чепура; под общей редакцией А.М. Кутепова и Д.А. Баранова; Фед. агентство по образованию, Мос. гос. ун-т инж. экологии, кафедра «Процессы и аппараты химической технологии». – М.: МГУИЭ, 2005. – 328 с.; ил.

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1. Криогенная газовая машина ЗИФ-1000	4
1.1 Цель работы	4
1.2 Теоретические сведения	4
1.2.1 Назначение установки	4
1.2.2 Устройство и принцип действия	7
1.2.3 Процесс получения холода (внутренний процесс).....	7
1.2.4 Устройство и принцип действия составных частей.....	9
1.2.5 Системы обеспечения нормальной работы и контроля за работой машины.....	20
1.2.6 Система охлаждения машины	22
1.2.7 Пусковая аппаратура и приборы управления	23
1.3 Выполнение работы	23
1.4 Контрольные вопросы	23
Лабораторная работа №2. Стационарная газификационная установка типа СГУ- 7КМ.....	24
2.1 Цель работы	24
2.2 Теоретические сведения	24
2.2.1 Описание установки	26
2.2.2 Основные элементы СГУ-7КМ	27
2.2.3 Принцип действия газификационной установки.....	32
2.3 Выполнение работы	36
2.4 Контрольные вопросы	36
Лабораторная работа №3. Гелиевая ожижительная установка Г-8.....	37
3.1 Цель работы	37
3.2 Назначение установки	37
3.3 Теоретические сведения	37
3.3.1 Получение гелия и его использование.....	37
3.3.2 Способы ожижения гелия	38
3.3.3 Описание схемы и аппаратов установки Г-8	40
3.4 Выполнение работы	45
3.5 Контрольные вопросы	46
Библиографический список.....	47

КРИОГЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ для обучающихся по направлению
14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и физика низ-
ких температур» очной формы обучения

Составители:

Королев Константин Геннадьевич

Отпечатано в авторской редакции

Подписано к изданию 00.00.0000.

Объем данных 5362 Кб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический
университет»

СПРАВОЧНИК МАГНИТНОГО ДИСКА

(Кафедра физики твердого тела)

КРИОГЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ для обучающихся по направлению
14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и физика низ-
ких температур» очной формы обучения

Составители: К.Г. Королев

МУ-140301-ЛР-КО.pdf 5362 Кб 00.00.0000 0,0 уч.-изд. л
(наименование файла) (объем файла) (дата) (объем издания)